



**T. C.**

**ORDU ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**RÜZGAR TEMELLİ PİEZOELEKTRİK GENERATÖR**  
**TASARIMI VE MPPT İLE KONTROLÜ**

**OKAN GÖKHAN USTA**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**YENİLENEBİLİR ENERJİ ANABİLİM DALI**

**ORDU 2019**

**T.C.**  
**ORDU ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**YENİLENEBİLİR ENERJİ ANABİLİM DALI**

**RÜZGAR TEMELLİ PİEZOELEKTRİK GENERATÖR  
TASARIMI VE MPPT İLE KONTROLÜ**

**OKAN GÖKHAN USTA**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ORDU 2019**

## TEZ ONAY

**Adınızı SOYADINIZI KOYU KARAKTERDE ADINIZIN İLK HARFI BÜYÜK OLACAK ŞEKİLDE VE SOYADINIZI BÜYÜK HARFLERLE YAZINIZ** tarafından hazırlanan “**TEZ KONUNUZU BURAYA KOYU KARAKTERDE, BÜYÜK VE KALIN HARFLERLE YAZINIZ**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı **Tarih girmek için burayı tıkladın** tarihinde yapılmış ve jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Ordu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **ANABİLİM DALINIZI SEÇİNİZ BİLİM DALINIZI SEÇİNİZ TEZİN TÜRÜNÜ SEÇİNİZ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman

Unvanı Adı SOYADI giriniz

İkinci Danışman

Unvanı Adı SOYADI giriniz

Bölümü, Üniversitesi

İkinci danışman yoksa bu satırı siliniz.

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman

Unvanı Adı SOYADI giriniz

Bölümü, Üniversitesi

Üye

Unvanı Adı SOYADI Giriniz

Bölümü, Üniversitesi

Üye

Unvanı Adı SOYADI Giriniz

Bölümü, Üniversitesi

Üye

(Gereksiz ise bu satırı siliniz)

Üye

(Gereksiz ise bu satırı siliniz)

... / ... / 20... tarihinde enstitüye teslim edilen bu tezin kabulü, Enstitü Yönetim Kurulu'nun ... / ... / 20... tarih ve ..... / ..... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

Enstitü Müdürü  
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Sami GÜLER

## TEZ BİLDİRİMİ

Tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan ve kullanılan intihal tespit programının sonuçlarına göre; bu tezin yazılmasında bilimsel ahlak kurallarına uyulduğunu, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezin içerdiği yenilik ve sonuçların başka bir yerden alınmadığını, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, tezin herhangi bir kısmının bu üniversite veya başka bir üniversitedeki başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını beyan ederim.

  
**OKAN GÖKHAN USTA**

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

## ÖZET

### RÜZGAR TEMELLİ PİEZOELEKTRİK GENERATÖR TASARIMI VE MPPT İLE KONTROLÜ

Okan Gökhan USTA

ORDU ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YENİLENEBİLİR ENERJİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ, 61 SAYFA

(TEZ DANIŞMANI: Dr. Öğr. Üyesi Sibel AKKAYA OY)

Gelişen teknoloji ve artan insan nüfusu ile enerjiye olan ihtiyaç artmaktadır. Günümüzde halen ağırlığını sürdürmekte olan geri dönüşümsüz ve ağır atıklar bırakan fosil yakıtlar dünya üzerinde çevresel, ülke ekonomilerinde geri dönülmez ekonomik olumsuz sonuçlara sebep olmaktadır. Bu sebeple çevreci alternatif enerji kaynakları üzerine olan çalışmalar günden güne artmaktadır. Bu çalışmada da piezoelektrik kristallerinden titreşime dayalı bir enerji üretim hedeflenmektedir. Bu titreşimi elde etmek içinde rüzgar temelli bir piezoelektrik generatör tasarımı oluşturulmuştur. Temel olarak; helis bir dikey eksen rüzgar kanatları üzerine yerleştirilmiş piezoelektrik titreşim enerji kartları ile rüzgar hızından faydalanarak bir titreşim oluşturulup elektrik enerjisi üretimi esansına dayanmaktadır. Gerçekleştirilen literatür taraması ile hasat edilen enerji türünün alternatif enerji olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmada ise üretilen elektrik enerji, tasarlanan doğru gerilim hasat kartı sayesinde doğru gerilim olarak üretim gerçekleşecek olup bu sayede sonradan AC-DC dönüşümlerindeki enerji kaybının da önüne geçmiş olundu. Böylece gelecekte ihtiyaç olacak enerji için bir çalışma gerçekleştirildi. Sonuç olarak tasarlanan rüzgar temelli piezoelektrik generatör ile kabul edilebilir seviyede bir enerji üretimi, depolanması ve bu enerjinin harcanması olayını gerçekleştirmiş olundu. Bu çalışma sayesinde gelecekte elektrik enerjisi üretim metotlarına katkıda bulunuldu.

**Anahtar Kelimeler:** Enerji Hasadı, Elektrik Üretimi, Piezoelektrik, Piezoelektrik Titreşim, Rüzgâr Enerjisi, Rüzgâr Tüneli.

## **ABSTRACT**

### **WIND BASED PIEZOELECTRIC GENERATOR DESIGN AND CONTROL WITH MPPT ALGORITHMS**

**Okan Gökhan USTA**

**ORDU UNIVERSITY INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED  
SCIENCES**

**RENEWABLE ENERGY**

**MASTER THESIS, 61 PAGES**

**(SUPERVISOR: Assist Prof. Dr. Sibel AKKAYA OY)**

The need of energy increases with the developing technology and increasing human population. Fossil fuels that leave heavy and non-recyclable wastes, which are still predominantly used today, cause adverse outcomes environmental aspects around the world and irreversible economic consequences in the states economies. Therefore, studies on eco-friendly alternative energy sources are increasing day by day. In this study, it is aimed to produce a vibration based energy production from piezoelectric crystals. In order to achieve this vibration, a wind based piezoelectric generator has been designed. Basically; helix is based on the essence of generating electric energy by making use of the wind speed with piezoelectric vibration energy cards placed on a vertical axis wind blades. According to the literature review, it was determined that the type of energy obtained was alternative energy. In this study, with the generated electrical energy and the designed harvest card, production will be realized as the correct voltage; and this also prevents the loss of energy in AC-DC conversions. Thus, a study was carried out for the energy which will be needed in the future. As a result, with the designed wind-based piezoelectric generator, an acceptable level of energy production, storage and consumption of this energy was realized. This study contributed to the future methods of electric power generation.

**Keywords:** Energy Harvest, Electricity Generation, Piezoelectric, Piezoelectric Vibration, Wind Power, Wind Tunnel.

## TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanması, araştırılması, uygulanması ve sonuçlandırılmasından ilgi ve desteğini esirgemeyen, bilgi ve tecrübeleri ile birlikte desteklerini her zaman üzerinde hissettiğim, başta danışmanım Dr. Sibel AKKAYA OY olmak üzere danışmanım gibi bana yaklaşan ve destekleyen hocam Dr. Ali Ekber ÖZDEMİR ve anabilimdalı başkanım Prof. Dr. Tahsin TONKAZ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarımın her aşamasında beni, tıpkı hayata olan inancımı arttırdığı gibi destekleyen, her sıkıntıda yanımda olan, biricik hayat arkadaşım Merve BAYRAM USTA'ya çalışmalarım esnasından ona ayırmam gereken zamandan çaldığım, hayat enerji kaynağım olan bir tanecik oğlum Yiğit Can USTA'ya ve bu tez çalışmasının uygulanması ve test aşamasında laboratuvar ve atölyeler çalışmalarında üzerimden desteklerini eksik etmeyen, Canik Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi, Elektrik-Elektronik Teknolojileri Alanı zümre öğretmeni arkadaşlarıma tüm kalbimle teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>TEZ BİLDİRİMİ</b> .....	I
<b>ÖZET</b> .....	II
<b>ABSTRACT</b> .....	III
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	IV
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	V
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	VII
<b>ÇİZELGE LİSTESİ</b> .....	VIII
<b>SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ</b> .....	IX
<b>1. GİRİŞ</b> .....	1
1.1 Mekanik Sistemlerde Titreşimden Enerji Elde Edilmesi.....	1
1.2 Piezoelektrik Etki ve Enerji Oluşumu.....	2
1.3 Piezoelektrik Malzemelerin Yapıları.....	4
1.4 Piezoelektrik Malzemenin Performansını Etkileyen Faktörler.....	6
1.4.1 Yaşlanma Etkisi.....	6
1.4.2 Mekaniksel Zorlama.....	6
1.4.3 Elektriksel Zorlama.....	7
1.4.4 Isıl Zorlama.....	7
1.5 Piezoelektrik Malzemenin Güç Hesabı.....	8
1.6 Piezoelektrik Malzemenin Uygulama Alanları.....	9
1.6.1 Basınç Sensörü ve Hareket Kontrolü Uygulamaları.....	9
1.6.2 Klavyeler ve Kontrol Panelleri.....	10
1.6.3 Elektroakustik Elemanlar ve Kristal Osilatörler.....	10
1.6.4 Trafik Sensörleri ve Müzikal Enstrümanlar.....	11
1.6.5 Titreşim Sensörü.....	11
1.6.6 Akselerometre ve Sensörler.....	12
1.7 Rüzgar Enerji Türbinleri.....	12
1.8 Rüzgar Enerji Türbin Modelleri.....	12
1.8.1 Yatay Dönüş Eksenli Rüzgar Enerji Türbinleri.....	13
1.8.1.1 Rüzgarı Alış Yönü Önden Olan Makineler.....	13
1.8.1.2 Rüzgarı Alış Yönü Arkadan Olan Makineler.....	14
1.8.1.3 Tek Kanatlı Rüzgar Türbinleri.....	14
1.8.1.4 Çift Kanatlı Rüzgar Türbinleri.....	15
1.8.1.5 Çok Kanatlı Rüzgar Türbinleri.....	16
1.8.2 Dikey Dönüş Eksenli Rüzgar Enerji Türbinleri.....	16
1.8.2.1 Savonious Rüzgar Türbinleri.....	17
1.8.2.2 Darrieus Rüzgar Türbinleri.....	18
1.8.2.3 H-Darrieus Rüzgar Enerji Türbinleri.....	18
1.8.3 Eğik Dönüş Eksenli Rüzgar Enerji Türbinleri.....	19
1.9 Rüzgar Türbin Tasarımlarının Karşılaştırılması.....	19
<b>2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR</b> .....	22
<b>3. MATERYAL ve YÖNTEM</b> .....	25
3.1 Giriş.....	25
3.2 Deneysel Yöntem.....	25
3.3 Deney Materyalleri.....	26
3.3.1 Piezoelektrik Film.....	26



3.3.2 PLA Hammaddeli 3 Boyutlu Yazıcı .....	27
3.3.3 Piezoelektrik Doğru Gerilim Hasat Kartı Tasarımı .....	28
3.3.3.1 Devre Tasarımında Kullanılan Elektronik Devre Elemanları .....	30
3.3.3.1.1 MBR0560 0.5A 60V Schottky Diyot.....	30
3.3.3.1.2 22uF 16V SMD Elektrolitik Kondansatör .....	30
3.3.4 Rüzgar Tüneli.....	32
3.3.5 Step Down (Buck Converter) Gerilim Düşürücü Devresi .....	34
3.3.6 VTK 1050 3 Kanal Analog Veri Toplama Kartı.....	35
3.3.7 Labview Veri analiz programı .....	36
3.3.8 Ölçüm Cihazları .....	38
3.3.9 Enerji Depolama ve Yük Devresi .....	38
<b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI</b> .....	<b>40</b>
4.1 Deney Düzenineğinin Oluşturulması .....	40
4.2 Piezoelektrik Üreteci ile Gerilim Ölçümleri .....	43
4.3 Piezoelektrik Üreteci ile Akım Ölçümleri.....	44
4.4 Piezoelektrik Üreteci ile Gerilim Düşürme İşlemi.....	46
4.5 Piezoelektrik Üreteci İle Güç Hesaplama .....	47
<b>5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER</b> .....	<b>50</b>
<b>6. KAYNAKLAR</b> .....	<b>53</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....	<b>61</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 1.1 (a)Piezoelektrik etkisi ve ters piezoelektrik etkisi altındaki maddelerin elektron hareketleri (b) Basınç altındaki piezo etkisi (c) Ters basınç altındaki piezo etkisi (d) Doğru polarma ters gerilim besleme etkisi (e) Ters polarma gerilim besleme etkisi .....	3
Şekil 1.2 Piezoelektrik malzeme yapıları .....	5
Şekil 1.3 Tek kanatlı Rüzgar Enerji Türbini.....	15
Şekil 1.4 Çok Kanatlı Rüzgar Enerji Türbini.....	16
Şekil 1.5 Dikey Eksen verimli Rüzgar Enerji Türbini Modelleri .....	19
Şekil 3.1 3 Kanatlı, Dikey Eksen Rüzgar Hasat Kanatları Modeli .....	25
Şekil 3.2 Kütleli ve Kütleli Piezoelektrik Titreşim Kartları.....	26
Şekil 3.3 Piezoelektrik Titreşim Kartı Teknik Çizimleri .....	27
Şekil 3.4 Ohm Kanunu.....	28
Şekil 3.5 Piezoelektrik Hasat Kartı Çalışma Prensibi.....	29
Şekil 3.6 N Adet Piezo Kart ile Oluşturulmuş Seri Graplama .....	29
Şekil 3.7 Sensör Devresi Yolları ve Üst Görünüş.....	30
Şekil 3.8 0.5A 60V Yüzey Dokunmalı Shottky Diyot .....	31
Şekil 3.9 22 mikro Farad 16 Volt Yüzey Dokunmalı Kondansatör.....	31
Şekil 3.10 Pleksiglas Tabaka .....	32
Şekil 3.11 Lazer Kesim Cihazı .....	32
Şekil 3.12 Rüzgar Tünelinin Radyan Motora Yerleşimi .....	33
Şekil 3.13 Dimmer Motor Hız Kontrol Devresi .....	33
Şekil 3.14 Step Down Gerilim Düşürücü Devresi Açık Şeması.....	34
Şekil 3.15 Step Down DC-DC Gerilim Düşürücü Devresi .....	35
Şekil 3.16 VTK 1050 Modeli Analog Veri Toplama Kartı .....	36
Şekil 3.17 VTK 1050 Veri Toplama Kartı Teknik Çizimleri .....	36
Şekil 3.18 LabVIEW Veri Toplama Akış Diyagramı Oluşturma.....	37
Şekil 3.19 LabVIEW Veri Toplama ve Dalga Analizi Grafiği oluşturma.....	37
Şekil 3.20 Rüzgâr Testlerinde Kullanılan Deney Düzeneği .....	38
Şekil 3.21 Süper Kondansatörlü Şarj ve Deşarj devresi .....	39
Şekil 4.1 Piezoelektrik Titreşim Hasat Kartlarının Seri Gruplar Halinde Kanatlar Üzerine Yerleşimi .....	40
Şekil 4.2 T8 Yaylı Trapez.....	41
Şekil 4.3 Havşa Delikli Neodyum Mıknatıs .....	42
Şekil 4.4 Transmisyon Mili.....	42
Şekil 4.5 Ölçülen Maksimum Gerilim Değerleri.....	44
Şekil 4.6 Ölçülen Maksimum Akım Değerleri .....	45
Şekil 4.7 Rüzgâr hızına göre Gerilim Akım Artış Eğrileri .....	45
Şekil 4.8 Üretilen Enerji Düşürülme ve Sonuç Akış Diyagramı .....	47
Şekil 4.9 Güç Hesabında Kullanılan Maksimum Akım Değeri.....	47
Şekil 4.10 Güç Hesabında Kullanılan Maksimum Gerilim Değeri .....	48
Şekil 4.11 Rüzgâr Hızlarına Göre Elde Edilen Güç .....	49

## ÇİZELGE LİSTESİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
<b>Çizelge 1.1</b> Büyüklüklerine Göre Türbinlerin Karşılaştırılması.....	20
<b>Çizelge 1.2</b> Rüzgarı Alış Yönüne Göre Türbinlerin Karşılaştırılması.....	20
<b>Çizelge 1.3</b> Kanat Çeşitlerine Göre Türbinlerin Karşılaştırılması.....	20
<b>Çizelge 3.1</b> Salınım mesafelerine göre üretilen gerilim.....	27
<b>Çizelge 4.1</b> Rüzgar Hızlarına Göre Gerilim Değerleri .....	43
<b>Çizelge 4.2</b> Rüzgar Hızlarına Göre Ölçülen Maksimum Akım Değerleri.....	44
<b>Çizelge 4.3</b> Rüzgar Hızlarına Göre Elde Edilen Güç Tablosu.....	48

## SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ

---

<b><math>\mu</math>Wh</b>	:	Mikrowattsaat
<b>mWh</b>	:	Miliwattsaat
<b>m/sn</b>	:	Metre/saniye
<b>mA</b>	:	Miliamper

---

## 1. GİRİŞ

Günümüzde; gelişen sanayi ve dünya üzerinde artan insan nüfusunu göre enerjiye olan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Bu talebe karşıda fosil yakıt kaynaklı ve geri dönüşümsüz enerji kaynakları arz edilmektedir. Geriye dönük bakıldığında fosil yakıtlar enerji kaynağının birincil unsuru iken kaynakların azalması ile insanoğlu alternatif enerji kaynaklarına doğru bir eğilim göstermiştir. Alternatif enerji kaynakları denilince de; Rüzgâr, Güneş, Hidroenerji ve Jeotermal enerji kaynakları başı çekmektedir. Bunların yanında mekanik ve titreşim temelli tasarımlarda günlük hayatın içinde kullanılabilir enerji kaynakları haline dönüşmektedir.

### 1.1 Mekanik Sistemlerde Titreşimden Enerji Elde Edilmesi

Son yıllarda elektrik kaynaklarına titreşim kaynaklı enerjilerde eklenmeye başlanmıştır. Bu konu üzerinde çalışmalar günden güne artmaktadır. Erişilen sonuç ve elde edilen güç ise giderek maksimum seviyelere ulaşmaktadır. Titreşimler kaynaklı mekanik enerjinin elektrik enerjisine dönüşümü ile ilgili yapılan tasarım çalışmaları her geçen gün giderek daha çok önem arz etmektedir. Bu çalışmalarla hedeflenen, titreşim ve basınç kaynaklı mekanik enerjiden olabildiğince fazla enerji elde edip, bu enerjinin elektrik temelli sistemlere kaynak olarak kullanılmaktadır. Bu titreşim enerjisi temelli yapılan çalışma ilk olarak 1996 yılında gerçekleştirilmiştir (Williams ve Yates, 1996). İncelenen çalışmada, elektromanyetik enerji ve temel iletim mekanizmalarının üretimindeki elektriksel kaynaklı güç çıkışını hesaplamak ve gerçekleştirmek için gerekli temel unsurlar açıklanmıştır. Burada da söz edildiği gibi, titreşim ve basınç kaynaklı elektrik enerjisini elde etmek için kullanılan 3 ana titreşim-enerji dönüşüm kriterleri vardır. Bunlar elektromanyetik (William ve Yates, 1996; Arnold, 2007) elektrostatik (Mitcheson ve ark., 2004) ve piezoelektrik (Roundy ve ark., 2003; Jeon ve ark., 2005) dönüştürücülerdir (Ertürk, 2009). Elektromanyetik (EMK) dönüştürücüler Faraday'ın çalışmalarından olan indüksiyon denklemine dayanır. Elektromanyetik sargılar 20  $\mu$ Wh ile 200 mWh arasında elektromanyetik enerji üretebilir. Bunun yanında indüksiyon sargıları alan konusundan çok yer kaplarlar ve çıkış gerilimleri 1Volt'dan küçüktür. İkinci dönüştürme metodu ise elektrostatik kaynaklı dönüştürücülerdir. Değişken bir kapasiteye sahip bir kondansatör kullanan elektrostatik malzemeler, Elektromekanik malzemelere göre daha az (10-40  $\mu$ W) enerji üretebilirler. Üçüncü dönüştürme

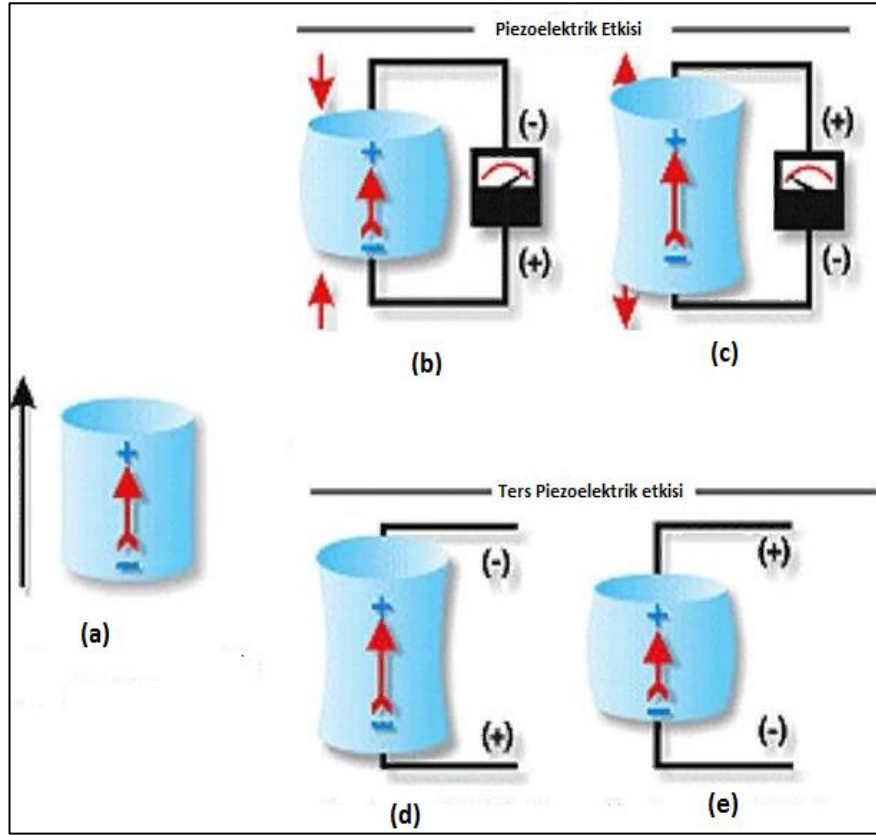
metodu ise, piezoelektrik kristalleri ile yapılan dönüştürücülerdir. Bu dönüştürücüler çok daha az yer kaplarlar ve 20 Volt'dan daha fazla çıkış gerilimlerine çıkabilmeleri nedeniyle diğerlerine göre daha üstün yönere sahiptir (Ortiz ve ark., 2013). Bununla birlikte, dışarıdan bir enerji kaynağına gerek olmaksızın basit bir mekaniksel yapıyla enerji dönüşümü işlemini gerçekleştirebilir. Micro, nano ve makro seviyelerinde farklı boyutlarda üretilebilme yeteneğine sahiptirler, uygulaması kolay ve yüksek enerji yoğunluğuna sahip olmaları sebebiyle tercih edilebilirler. Bu tür avantajlara sahip olmalarına rağmen, yüksek güç çıkışı empedansları nedeniyle üretilen akım değerleri oldukça düşüktür (Ali ve Nagib, 2012).

Piezoelektrik özellik titreşim ve basınç temelli mekaniksel bir enerjiye maruz kaldığında elektrik enerjisi üreten ve aynı piezoelektrik özellik gösteren maddelerin üzerine elektrik enerjisi uygulandığında ise titreşim üreten maddelerdir. Bu türlü özelliklere sahip olduğu ilk olarak 1880 yılında Jacques Curie ve Pierre Curie isimli kardeşler tarafından sergilenmiştir. Çalışmalarında, kuartz kristali üzerine uygulanan mekanik basınç etkisi ile elektriksel bir güç oluşturduğunu vurgulamışlardır; cane şekeri, kuvars, topaz, tourmaline, rochelle tuzu (sodium potassium tartrate tetrahydrate) kristalleri ile yaptıkları çalışmalarla piezoelektrik etki deneyler ile akademik olarak ispatlanmıştır (Bottom, 1981; Garcia ve ark., 1998). Ters piezoelektrik etkinin oluşumu ise 1881 yılında Gabriel Lippman yaptığı çalışmalarında ispatlamış ve sonuçlarını ortaya koymuştur (Garcia ve ark., 1998; Ledouks, 2011).

## **1.2 Piezoelektrik Etki ve Enerji Oluşumu**

Piezoelektrik etki pozitif ve negatif kutuplarla yüklenmiş katı maddelerden oluşur. Bu negatif ve pozitif yüklü parçacıklar element içerisinde denge durumundadırlar. Denge durumunda piezoelektrik kristaller, elektriksel yükü bulunmamaktadır. Fakat mekanik metotlarla piezoelektrik kristal üzerine bir mekanik kuvvet uygulandığında ve ya katı madde titreşime maruz kaldığında piezoelektrik kristaller pozitif yüklerin merkezi ile negatif yüklerin merkezi birbirlerini iterek uzaklaşmaya başlarlar ve piezoelektrik kristalin yüzeylerinde pozitif ve negatif zıt yüklerin oluşmasına neden olur. Yüklerin bu şekilde oluşması bir elektrik enerjisi alanının oluşmasına ve maddenin karşılıklı yüzeyleri arasında ölçülebilir bir elektrik enerjisi farkını oluşturur. Piezoelektrik etki için bu oluşan işlemlerin tersi içinde geçerlidir. Ters

piezoelektrik etki ise; birbiri ile karşı karşıya duran iki yüzey arasında elektrik gerilim uygulanan bir kristalde, fiziksel olarak boyut ve ölçü olarak şekil değişimi gerçekleşmektedir (Ballato, 1996). Şekil 1.1’de basınç ve ters gerilim altındaki maddede oluşan piezo etkisi altında oluşan elektron hareketleri sergilenmektedir. Demir, (2017) tarafından yapılan çalışmada Piezoelektrik kristal uygulamaları için oldukça fazla seramik kristali türleri incelenmiştir. Yapılan incelemeler arasında ise en çok kullanılan kristal türleri, Piezoelektrik kristal ve  $BaTiO_3$ ’dür. Bu kristal malzemelerin, kimyasal bileşimlerini ve oluşturma metotlarının değiştirilmesiyle piezoelektrik etki kazanan iki farklı tür malzeme yapılarının temelini oluşturduğundan bahsederek en çok tercih edilen piezoelektrik maddeleri tespit etmiş bulunmaktadır (Demir, 2017).



**Şekil 1.1** (a)Piezoelektrik etkisi ve ters piezoelektrik etkisi altındaki maddelerin elektron hareketleri (b) Basınç altındaki piezo etkisi (c) Ters basınç altındaki piezo etkisi (d) Doğru polarizasyonla ters gerilim besleme etkisi (e) Ters polarizasyon gerilim besleme etkisi

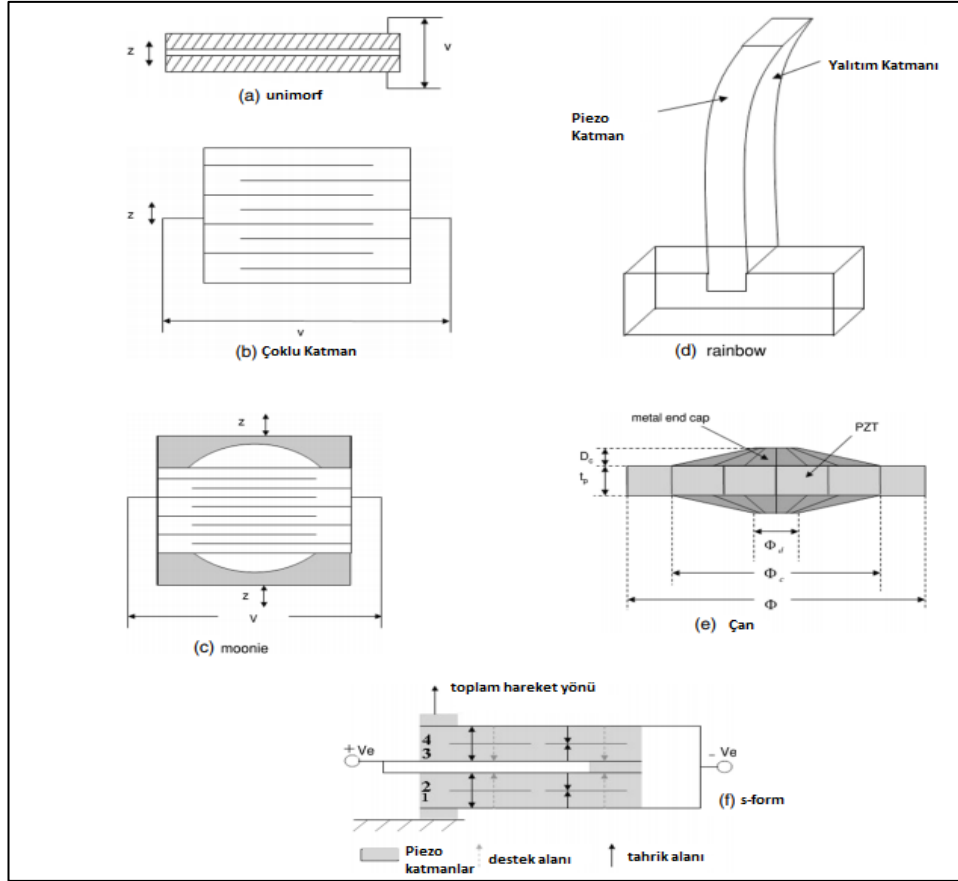
Simetrik yapıda olan kristal maddelerin son yörüngelerinde bulunan tekli elektronların madde atom çekirdeği tarafından daha iyi çekildiğinden elektron geçişleri daha güç olmaktadır. Bu özellik sebebi ile, bu türe sahip kristal maddelerin elektriksel alan oluşturma özelliğini kısıtlayan bir durumdur ve simetrik özelliğe sahip olan kristal maddelerde piezoelektrik özelliğe rastlanmaz (Anonim, 2017c; Quin-Hua, 2013).

Piezoelektrik etki, Kurşun zirkonat titanat (PZT), Lityum sülfat, Rochelle tuzu, Kuvvars ( $\text{SiO}_2$ ), Turmalin, Kadmiyum sülfid, Çinkooksit ( $\text{ZnO}$ ), ( $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6\text{-4H}_2\text{O}$ ), Baryum titanat ( $\text{BaTiO}_3$ ) vb. tek kristal kutuplanma yönüne sahip piezoelektrik kristallerde görülür. Bununla birlikte, Lityum fosfat (LP), Dipotasyum tartarat (DPT), Etilen diamin tartarat (EDT), Amonyum dihidrojen fosfat (ADP) gibi laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiş piezoelektrik kristallerde piezoelektrik etki oldukça az olmasına rağmen, bu kristal malzemeleri de piezoelektrik kristal yapımında kullanıldığı görülür (Yazıcı ve ark., 2003; Yazıcı ve ark., 2004).

### **1.3 Piezoelektrik Malzemelerin Yapıları**

Gerçekleştirilecek olan çalışmanın türüne göre kullanılacak olan piezoelektrik materyal formları değişmektedir. Kullanım türüne göre seçilecek olan piezoelektrik materyaller maksimum performans elde etme aşamasında önem arz etmektedir. Piezoelektrik malzemeler s-morf, çoklu katman, unimorf, rainbow, bimorf, moonie ve çan yapılarında üretilirler. Şekil 1.2’de piezoelektrik malzeme mekanik ve fiziksel yapıları sergilenmektedir. Bir ve ya iki katmanlı piezoelektrik kristallerden oluşan kiriş yapısına sahip piezoelektrik maddeler bimorf ve unimorf yapı olarak adlandırılır. Unimorf yapı (Bkz. Şekil 1.2a), bir piezoelektrik yapıda ve bir de piezoelektrik yapıya sahip olmayan iki levha yapısının bir araya gelmesi ile oluşurlar. Unimorf yapı elektrik enerjisinin üretimi uygulamalarında oldukça fazla çıkış gerilimi sebebiyle tercih edilir. Piezoelektrik kristalli kiriş yapıları çoğunlukla ufak gerilme seviyelerinde kullanılırken fazla gerilme seviyeleri için seramik/metal kompozit içerikli maddeler oluşturulmuştur.





Şekil 1.2 Piezoelektrik malzeme yapıları (Cook-Chennault ve ark., 2008)

Metal bileşenler, oluşan baskıyı üzerinden Seramik yapıya aktarırlar. Metal dış katmanının gerinimleşmesi ile oluşan titreşim mekanikleri ile, piezoelektrik kristal içerikli malzeme üzerinde geniş bir titreşimli alanı oluştururlar. Bu yapılar moonie (Bkz. Şekil 1.2c), ve çan (Bkz. Şekil 1.2e), yapıları olarak isimlendirilir. Çan yapıda tepesi kesilmiş koni biçiminde iken moonie de genişleme boşlukları yarım ay şeklinde bir forma sahiptir. Kullanılan boşlukların başlıca işlevi, mekanik kısımında oluşan basıncı absorbe etmektir. Rainbow yapı ise (Bkz. Şekil 1.2d), piezoelektrik kristallerdeki kurşun metalinin tek bir katman üzerinde kimyasal etki ile azaltıldığı yapıdır. Bir elektrik enerjisi alanı içinde oldukça fazla yer değiştirme yeteneği ile geliştirilmiş yük kapasitesi özelliğine sahiptir (Cook-Chennault ve ark., 2008).

#### **1.4 Piezoelektrik Malzemenin Performansını Etkileyen Faktörler**

Herhangi bir piezoelektrik malzeme, diğer bütün malzemelerde olduğu gibi içeriğinin belirlediği çalışma koşullarından en yüksek performansı gösterir. Bir piezoelektrik malzemeyi de bu sınırları aşarak çalışmaya zorlamak o malzeme üstünde olumsuz etkiler oluşturacaktır. Bunun sonucunda da piezoelektrik malzemede performans düşüşleri ve akabinde piezoelektrik özelliğini yitirmesine sebep olunmuş olur. Bu durum sonucunda piezoelektrik malzemenin polarite yitirmesine ve zaman içerisinde de piezoelektrik sabitlerinde kayıplar yaşanmasına sebep olmaktadır. Normal koşullarda bile uzun süreli piezoelektrik seramiklerinde zamana bağlı logaritmik olarak polarizasyon düşüklükleri yaşanması gözlemlenmektedir (Ergun ve ark., 2006; Elvin ve ark., 2003).

##### **1.4.1 Yaşlanma Etkisi**

Yaşlanma etkisi, zamanla piezoelektrik kristallerinin içerik özelliklerini ve polaritesinde kayıpların yaşanmasına denilebilir. Yaşlanma etkisi, piezoelektrik malzemenin normal şartlarda kullanılmasında bile gözlemlenebilir. Bu durum normalde beklenen bir durumdur. Yaşlanma etkisi tam manası ile piezoelektrik malzemeyi oluşturan seramik malzemenin birleşimine ve piezo malzemeyi hazırlamak için seçilen imalat metotlarına bağlıdır. Piezoelektrik malzemeye sınırlarını aşacak şekilde mekanik, elektrik ve ısı kuvvet uygulamak piezoelektrik malzemenin yaşlanmasına olan etkiyi arttıracaktır (APC International, 2006)..

##### **1.4.2 Mekaniksel Zorlama**

Piezoelektriksel malzemelerin, mekanik olarak gerilme ve basınç miktarlarının sınırları bellidir. Üzerine uygulanacak olan gerilme ve basınç piezoelektrik malzemeyi oluşturan seramiklerin cinsine göre değişmektedir. Varsayılan sınırların dışında bir gerilme ve basınç zorlanmasına maruz kalan polarize edilmiş piezoelektrik malzemeler, üzerindeki polariteyi kısmen ya da tamamen kaybetmiş olur. Sonuç olarak; piezoelektrik malzemenin gerilme ve basınç dayanımının sınırları malzemenin malzemeye değişim gözlenmektedir (APC International, 2006).

### **1.4.3 Elektriksel Zorlama**

Polarize işlemi tamamlanmış bir piezoelektrik bir malzeme, polarizasyon doğrusuna ters yönde güçlü bir elektrik alanının maruz kalırsa piezoelektrik malzemenin polarizasyonunda bozulmalar meydana gelecektir. Ters elektrik alanının etkisi; piezoelektrik malzemenin maruz kaldığı, sıcaklığa, ters elektrik alanının uygulama süresine ve diğer faktörlere doğru orantılıdır. Ancak 200-500 V/mm veya daha büyük elektrik alanlar, önemli bir bozulmaya sebep olur. AC akım altında elektriksel bozulma etkisi, maruz kaldığı her çevrimde ters yönlü gerçekleşen yarım saykılarda depolarize olur (APC International, 2006).

### **1.4.4 Isıl Zorlama**

Çalışma sıcaklığı arttıkça, piezoelektrik malzemeler özelliklerini ters orantılı olarak kaybetmektedirler. Eğer bir piezoelektrik malzemeler için sınır sıcaklık değeri olan Curie sıcaklığına ısıtılacak olursa, malzeme içindeki bölgeler yok olacaktır. Bu nedenle bölgelerin yok olmasıyla piezoelektrik malzeme depolarize olmuş olur (Hagewald, 2000). Bu olay gerçekleştikten sonra malzemenin sıcaklığı ve ortam sıcaklığı oda koşullarına getirilmiş olsa bile piezoelektrik malzeme piezoelektrik etki özelliğini yitirmiş olacaktır. Sonuç olarak piezoelektrik malzeme kritik sınır değeri olan curie sıcaklığını altında olmak zorundadır. Piezoelektrik kristalleri için tavsiye edilen en üst kullanma sıcaklığı, curie sıcaklığının yarısıdır. Sıralı ardışık gerilim üretimi için bağlı olan piezoelektrik dizinde herhangi bir piezoelektrik malzeme kritik değer olan curie sıcaklığı değerini geçerse diğerlerini de depolarize ederek olumsuz etki yaratmış olacaktır (APC International, 2006).

Bütün bu incelemelerde sonra şu sonuçlar varabiliriz; piezoelektrik materyallerin piezo etki süresi belli bir süre için geçerlidir. Bundan dolayı tasarım yapılırken piezoelektrik malzeme seçimi, çalışma koşulları yani teknik bilgilerini iyice belirlememiz gerekir. Piezoelektrik malzemenin çalışma koşulları altında değişime ve bozulma süresi ne kadar uzunsa malzeme o kadar kararlı denilebilir.

### 1.5 Piezoelektrik Malzemenin Güç Hesabı

Bir piezoelektrik kristal elementi doğrudan bir dönüştürücü olarak kullanılması istendiğinde piezoelektrik kristalin kullanımı ile elde edilecek gücün sonucunu etkileyen parametreler; haliyle piezoelektrik kristal modelinin seçiminde karar vermeyi etkileyen birçok faktör vardır. Düşük mekaniksel gerinimler (T) altındaki doğrusal bir piezoelektrik kristal materyalinin asıl eşitlikleri Eşitlik 1.1 ve Eşitlik 1.2'de verilmektedir.

$$x = S^D \cdot T + gD \quad (1.1)$$

$$E = gT + \beta^x \cdot D \quad (1.2)$$

Burada,

---

x	: Zorlama etkisi
D	: Birim alandaki elektrik yükü
E	: Elektrik alanı
s	: Esneklik uyumu
g	: Piezoelektrik gerilim katsayısı
$\beta$	: Dielektrik duyarlılığı
T	: Mekanik gerinimleme

---

$$g = \frac{d}{\epsilon_0 \cdot \epsilon E^x} \quad (1.3)$$

Eşitlik (1.3)'e göre ;

---

D	: Piezoelektrik yük sabiti
$\epsilon$	: Elektriksel geçirgenlik

---

Eşitlik (1.2)'daki ( $\beta$ ) dielektrik duyarlılığı sabiti ters dielektrik geçirgenlik tensörüyle eşittir.  $F=T \cdot A$  kuvveti altında (A alandır) seramiğin açık devre gerilimi (U) Eşitlik 1.2'dan yararlanılarak şu şekilde bulunur:

$$U = E \cdot t = g \cdot T \cdot t = \frac{-gFt}{A} \quad (1.4)$$

Burada,

---

t	: Deramiğin kalınlığı
Q	: Piezoelektrik seramikte üretilen elektrik yüküdür

---

Piezoelektrik seramikte üretilen elektrik yükü (Q) Eşitlik 1.1 ile şu şekilde oluşturulur:

$$U = \frac{Q}{A} = \frac{E}{\beta^x} = \frac{U \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon^x}{t} \quad (1.5)$$

ya da

$$\frac{Q}{U} = \frac{A \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon^x}{t} = C \quad (1.6)$$

Bu eşitliklerde görülen C, materyalin kapasitansdır. Bu ilişki bize, düşük frekanslarda bir piezoelektrik yüzeyin paralel bir kapasitör gibi davrandığını gösterir. Bundan dolayı elde edilebilecek güç miktarı Eşitlik (1.7)'de verilmiştir. Burada,  $V=A.t$  piezoelektrik jeneratörün hacmidir.

$$P = \frac{1}{2} \cdot \frac{d^2}{\epsilon_0 \cdot \epsilon^2} F^2 \frac{1}{A} f \cdot P = \frac{1}{2} C \cdot V^2 f = \frac{1}{2} (dg) \cdot T^2 \cdot V \cdot f \quad (1.7)$$

Sabit bir alan ve sabit kalınlıkta verilen bir materyalin elektriksel gücü materyalin  $d^2/\epsilon^2$  oranına bağlıdır. Yüksek bir  $d^2/\epsilon^2$  oranına sahip bir materyalden yüksek güç elde edilecek demektir (Ertürk ve İnman, 2011).

## 1.6 Piezoelektrik Malzemenin Uygulama Alanları

Piezoelektrik kristal malzemeler, elektrik enerjisi kaynağı özelliği sebebiyle oldukça fazla alanda ve uygulamalarda tercih edilebilmektedir. Fiber kompozit yapılar (PFC), Poliviniliden Florid (PVDF) ve yeni geliştirilen polimer köpük (PP-polypropylene) üzerinde yapılan laboratuvar çalışmaları ve araştırmaları devam ederken ve diğer kristallere göre daha esnek, hafif ve ucuz olan bu türlü kristal malzemeler ile elektrik enerjisi üretiminde artış görüldüğü saptanmıştır. (Ertürk ve İnman, 2011). Günümüzde kullanım alanlarını inceleyecek olursak:

### 1.6.1 Basınç Sensörü ve Hareket Kontrolü Uygulamaları

Ev ya da diğer binalardaki insan hareketleri, belirli bir alandaki trafik akışı, bir sistemin çalışma esnasındaki durumunun güvenlik ve sağlık açısından kontrol edilmesi talep edilebilir. Bu gibi kontroller hâlihazır durumda, infrared sensörler ve özel kameralar ya da piezoelektrik sensörler ile kontroller sağlanmaktadır. Fakat; belirlenen alanlardaki kullanılan zeminlere piezoelektrik polimer film kristaller ile döşeyerek de ortamdaki hareketlilik takip edilebilir (Paajanen ve ark., 2001). Bir

diğer uygulama ise, kayakçıların atlama platformuna piezoelektrik sensörler konumlandırmaktır (Anonim, 2009). Bu şekilde kayakçının zemine uyguladığı basınç dağılımı gözlemlenebilirken yere basma miktarı, attığı adım sayısı ve zıplama öncesi hazırlık durumları gibi birçok etkenin tespiti içinde kullanılabilir. (Lekkale ve Paajanen, 1999). Son yıllarda kullanılan Piezoelektrik sensör dönüştürücüler, yatağa bağlı bir şekilde yaşamını sürdürmek zorunda kalan insanların solunumu ve diğer vücut hareket fonksiyonlar ölçebilecek durumdadır. Hatta ve hatta piezoelektrik sensör düzeneği, hastanın bağımsız bir şekilde yatağın alt kısmına yerleştirilerek istenilen ölçüm işlemi gerçekleştirilmiş olur (Siivola ve ark., 1993). Piezoelektrik polimer filmler o kadar hassastır ki elektromekaniksel filmlerin (ETMF) etrafları kaplanarak elde edilen dönüştürücü ile hayvan yerleşkeleri ve çiftliklerde ahırlara yerleştirilmesiyle hayvanların bütün hareketlerinin ölçülmesi yeteneğini kazanmış olur (Raisanen ve ark., 1992; Heikkinen ve ark., 1997).

### **1.6.2 Klavyeler ve Kontrol Panelleri**

Hücresel piezoelektrik polimer film malzemelerden yapılmış butonlar, klavyeler ve kontrol panelleri mevcuttur. Özellikle klavyeler Çin ve Hindistan ticari olarak üretilmektedir. Üretilen bu klavyeler ve toplu taşıma sistemlerinde, hastanelerde ve devlet kurumlarında bilgilendirme, yönlendirme, makine kontrolü ve okuma panellerinde bulunmaktadır (Anonim, 2016). Kullanılan malzemenin, yüksek hassasiyeti ve sağlamlığı ile korumalı kontrol panelleri ısı ve nemden bağımsız bir şekilde kullanılmaktadır. Son olarakta bilet makineleri ve online tahsilat sistemlerinde halen kullanılmaktadır (Lekkale, 1997; Lakkale ve Paajanen, 1999).

### **1.6.3 Elektroakustik Elemanlar ve Kristal Osilatörler**

Piezoelektrik malzemeler özellikle piezoelektrik polimerler ses sistemleri uygulamalarında oldukça fazla uygulama alanlarına sahiptir. B-Band Ltd. ve Emfit Ltd. şirketleri tarafından üretilen pikaplar ve mikrofonlar bu uygulamaların ilklerini oluşturur (Anonim, 2010). Endüstriyel ve müzik sektöründe önde kullanılan pikaplar 50 Hz ile 23 kHz aralığında bir bant genişliği aralığında; 0.05%' lik bozulma ile ve 90 dB'lik ses gücüne sahiptir. Bunların yanında, 0.7 mV/Pa (mikrofon transfer hassasiyeti) oranı ile polipropilen mikrofonlar ne kadar hassas bir ses yapısı sunduğunu sergilemektedir. Bu da 100 pC/N piezoelektrik katsayısına denk gelmektedir. Malzeme içindeki piezolektrik katmanların sayıları artırılarak

hassasiyeti de o denli artırılır (Hoffman ve ark., 2002; Hillenbrand ve Sessler, 2004). Radyo, televizyon, AM alıcı ve vericilerde ve telsizlerde sinyal üreteçleri olarak kullanılırlar ve en yüksek frekans kararlılığına sahip osilatörler piezoelektrik etkiyle çalışan kristal osilatörleridir. Quartz ve Rochelle tuzu içerikli bu kristaller, mekanik titreşimin yoğunluğu, piezoelektrik kristale uygulanan gerilimle doğru orantıya sahiptir. Osilasyon frekansı, kristalin seri rezonans frekansı hesaplanması ile gerçekleştirilir (Demirel, 2014).

#### **1.6.4 Trafik Sensörleri ve Müzikal Enstrümanlar**

Sinyal frekansları ile veri işlemede ve gerçek zamanlı anlık veri iletimindeki yaşanan gelişmeler ucuz gerçekçi sensör teknolojisinin gelişimine sebep olmuştur. Bu gelişen teknoloji ile birlikte yolun yoğunluğu, araç sayısı ve araç tipi ve yolun durumu gibi bilgiler yola yerleştirilen piezoelektrik sensörlerin yol hareket kontrolü yeteneğinden faydalanılarak elde edilebilmektedir.

Elektronik ile müzikal aletler arasında gerçekleşmiş olan bağlantının ve elektroniğin müzikalde daha fazla kullanılması vurmali çalgıların (davul) ve piyano sesleri arasında bir problemler yaşanmasına sebep olmuştur. Bu iki müzik enstrümanının birlikte kullanılması yüksek bir hız oranı ve yüksek bir frekans aralığı kullanılmasına ihtiyaç duyar. Bu sebeple, müzikal aletlere piezoelektrik kristal malzemeler eklenerek piyanistin ve davulcunun en hassas ses hareket ve frekanslarını bile piezoelektrik malzeme sayesinde algılanarak hassas bir ses süzme işlemi gerçekleştirilmiştir (Ertürk ve İnman, 2011).

#### **1.6.5 Titreşim Sensörü**

Piezoelektrik kristal filmlerin ilk uygulamalarından biri bir keman için geliştirilen akustik pikap uygulaması olarak bilinir. Daha sonra bu malzeme bir gitar, violin ve çello üzerine yerleştirilerek tepkisi hakkında çalışmalar yapılmış ve bu çalışmalar ile piezoelektrik malzemenin titreşim ve hız sensörü olarak kullanılabileceği sonucunu ortaya sürülmüştür (Anonim, 1999; Korkmaz, 2015; Moheimani ve Fleming, 2006).

Piezoelektrik kristal malzemeler müzik pikaplarının ses kontrolü, bir makinenin çalışması kontrollerinde; rulman üzerindeki aşınmaların kontrolü, fan akışı, fan hız tespitinde ve otomat sensörü olarak kullanıldığı görülmektedir (Ertürk ve İnman, 2011).

### **1.6.6 Akselerometre ve Sensörler**

Akselometrelerin tasarımı, geleneksel piezoelektrik polimer malzemeler kadar iyi olan piezoelektrik seramik temelli malzemeler ile meydana getirilebilmektedir. Bu malzemenin seçimi akselometrelerin özel uygulamalarda kullanılmasına yardımcı olmaktadır. Bu alanlarda piezoelektrik malzeme, tahribatsız test (NDT) cihazlarında , tıbbi görüntüleme (Ultrason) cihazlarında, mikrofonlarda, ses hoparlörlerinde, sonarlarda, akustik emisyonda ve sıvı seviye sensörü olarak kullanılabilir (Gu ve ark., 1994; Chunsheng, 2011).

### **1.7 Rüzgar Enerji Türbinleri**

Rüzgar temelli enerji üreten ilk rüzgar enerji türbini, 1891 yılında aerodinamiğin duayeni niteliğine sahip mühendislerinden birisi Paul la Cour imzası ile Danimarka'da tasarlanıp imal edilmiştir. Elektrik enerjisinin diğer metotlar ile üretimi maliyetli olduğundan, 80'li yılların başında, endüstrinin ve teknolojinin gelişmesi sonucu 55 kW kapasiteye sahip rüzgar türbinlerinin yapılıp, üretilmeye başlanmıştır. Rüzgar enerjisi endüstrisinin gelişmesi ve Avrupa'da bulunan Risoe National Laboratuvarı yardımları ile Avrupa Rüzgar Atlası geliştirilerek bu atlas çerçevesinde elektrik üretimi daha iktisadi hale gelmeye başlamıştır (Doğanay ve Coşkun, 2017).

### **1.8 Rüzgar Enerji Türbin Modelleri**

Tarihten günümüze kadar çeşitli modeller ve tasarımlar denenerek makinelerinde kullanılan türbinleri farklı tiplerde çeşitlilik göstermektedir. Şimdiye kadar değişik özellikte ve modelde gerçekleştirilen bu rüzgar türbinlerinden bazı modelleri günümüzde elektrik üretebilir hale getirilip ticari kullanıma sunulmuştur. Çeşitli tasarımlar denerek kimisi tasarım aşamasında kalmış, kimisi ticari amaçlı kullanılarak varoluşunu sürdürmüştür (Nurbay ve Çınar, 2005; Potuk, 2015; Köse ve Özgören, 2005).

Rüzgar enerji türbinleri dönüş eksenine sınıflandırılır.

Bunlar;

- Yatay dönüş eksenli rüzgar türbinler
- Dikey dönüş eksenli rüzgar türbinler
- Eğik dönüş eksenli rüzgar türbinler



### **1.8.1 Yatay Dönüş Eksenli Rüzgar Enerji Türbinleri**

Bu türbinlerde; kanatlar rüzgar yönüne dik, dönme eksenini rüzgar yönüne paralel olarak tasarlanmıştır. Bu türbinlerde rotor milinde bulunan kanatların sayısı azaldıkça rotor hızlı dönüşler gerçekleştirmektedir. Bu türbinlerin verimi yaklaşık 45% olarak hesaplanmıştır (Doğanay ve Coşkun, 2017). Yatay eksen rüzgar türbinlerinin tasarımları yerden 20 metre ile 30 metre yükseklik aralığında ve çalışılabilir engel yakınlığı 10 metre yükseklik sınırları içinde yerleştirilmelidir. Kanatlara çarpan rüzgar hızının, rotor miline bağlı kanatların uç hızına bölünmesi ile elde edilen orana kanat uç hız oranı ( $\lambda$ ) denir. Eğer;

- $\Lambda = 1 - 5$  Çok kanatlı rotor,
- $\lambda = 6 - 8$  Üç kanatlı rotor,
- $\lambda = 9 - 15$  İki kanatlı rotor,
- $\lambda > 15$  Tek kanatlı rotor kullanılır.

Yatay eksen rüzgar enerji türbinleri, farklı sayıda rotor hareket kanatlarına sahip olan ve rüzgarı alışı yönü önden olan veya rüzgarı alışı yönü arkadan olan sistemler olarak çeşitli sistemleri mevcuttur (Newman, 1974).

#### **1.8.1.1 Rüzgarı Alışı Yönü Önden Olan Makineler**

En genel kullanım modeli olarak kullanılan bu makinelerde rotor milinin eksenini rüzgar yönüne dik olarak konumlandırılır. Bu makinelerin en önemli üstünlüğü kulenin arka kısmında meydana gelecek rüzgar gölgelemesinden kaynaklanacak etkinin oldukça az oluşudur, yani rüzgar kuleye bükümlenerek varır. Kulenin yuvarlak ve ya düz oluşu kanadın kulenin önünden her geçişinde türbinin kanatlarının generatöre ilettiği güçte düşüşler yaşanır. Böylece; rüzgar eğilmesinden bükülmeler yaşanacağından kanatların hafif ve sert yapıda olması gerekir ve kanatlar ile kule arasında biraz mesafe olması gerekir. Öte yandan, rüzgarı önden alan makineler, rotor milini rüzgara karşı döndürebilmek için Rüzgar kanat açısı değiştirmek için mekanizmasına gerek duyarlar (Nurbay ve Çınar, 2005).

### **1.8.1.2 Rüzgarı Alış Yönü Arkadan Olan Makineler**

Bu makinelerin rotorları kulenin arka kısımlarında konumlandırılır. Bunların önemli üstünlüğü rüzgara dönmek için rüzgar kanat açısı değiştirmek için mekanizmaya ihtiyaç duymayışlarıdır. Şayet nacelle ve rotor eksenini uygun bir tasarım haline getirilirse, nacelle rüzgarı kanatların arkasından rüzgardan bağımsız olarak izler. En önemli bir üstünlük kanatların esnek fiberglas ve ya kompozit malzemeden yapıldığı için hafif özelliğe sahip olmasıdır. Bu özellik, makineyi güç dinamiği açısından önemli bir üstünlüktür olarak görülebilir. Sonuç olarak; bu makinelerin avantajları önden rüzgarlı makinelere göre kule rüzgar ve gölgeleme yükünün az oluşudur. Ancak, kanat kuleden geçerken meydana gelen rüzgar gücü dalgalanmaları, türbine rüzgarı önden alan makinelerden daha çok zarar verdiği görülür.

### **1.8.1.3 Tek Kanatlı Rüzgar Türbinleri**

Tek kanatlı rüzgar türbinleri tasarımlarının yapılmasının sebebi, kanat sayısına göre yüksek hızlarda dönebilmesi ve bu hızla beraber kullanılan makine yükünün ve rotor miline bağlı döndürme momentini indirgemektir. Ek olarak rotor miline bağlı kanat, kanat üzerindeki mekanik yükü azaltacak kanat mekanizma hareketinin sürtünmesiz ve kanat kativasyonu yaşanmaksızın olabilmesi için, tek mil üzerine sabitlenip, 2 karşı ağırlıkla dengelenmelidir. Öte yandan tek kanatlı rotorlarda, denge yükü ile oluşan aerodinamik balans hatalarının ve mekanizma hareketinin kontrol altında tutulması için rotor kontrol mili çok iyi yapılmalıdır. MBB firması tarafından tasarlanan, her birinin tesis gücü 630kW olan ve rotor çapı 56m üç tip RT Almanya'nın Wilhelmshaven yakınında çalışmaktadır (Nurbay ve Çınar, 2005). En önemli tasarımsal dezavantaj ise 120m/sn ve üzerindeki kanat uç hızının neden olduğu rotor milinin aerodinamik balans ve yük seviyesi değerleridir. Bir kanatlı rüzgar türbinlerinin kanat uç hızı, üç kanatlı rüzgar türbinleri ile karşılaştırmak istediğimizde, iki kat yüksek ve daha fazla gürültü barındırmaktadır. Şekil 1.3'de bahsi geçen rüzgar türbinine ait görsel sunulmaktadır.



**Şekil 1.3** Tek kanatlı Rüzgar Enerji Türbini (Avcı ve ark., 2015)

#### **1.8.1.4 Çift Kanatlı Rüzgar Türbinleri**

Üç kanatlı türbin çeşidine göre rotor mili maliyetinin azaltılmak istenmesi bu türbinin tasarlanmasına sebep olmuştur. Birçok ülkede 10 metreden 100 metreye kadar rotor çapına sahip rüzgar türbinler tasarlanmıştır, Bu ticari rüzgar türbinlerden sadece birkaç tanesi prototip tasarımdan, seri üretime geçebilmiştir.

İki kanatlı rotorda balans oluşumu, bir kanatlı rotora göre daha az görülmektedir. Ancak iki kanatlı türbinlerde rotorun neden olduğu dinamik hareketlerin önlenmesi için ek olarak teknik güç ve tedarik bedeli, maliyet üzerinde olumsuz yönde bir etkiye sebep olmaktadır. Rotor milinin titreşimi azaltmak için rotora ilave bir dişli ve shaft sistemi eklenmiştir. Bu sistem, rotor miline dik bir konumda ve iki rotor kanadına da dik olarak yerleşimi gerçekleştirilir. Üç kanatlı rotorla karşılaştırıldığında ise en büyük avantajı; kanat uç hızlarının yüksek oluşudur. Bu rüzgar türbinlerinin gürültü seviyesinin yüksek olması ve düşük rüzgar hızlarında (3 m/sn) çalıştırılması dezavantajıdır. Günümüzde iki kanatlı rotor, şimdi birkaç ünitedir ve en az bir an için artan piyasaya dikkat edecek olursak iki kanatlı rotora hiçbir eğilim bulunmamaktadır (Nurbay ve Çınar, 2005).

### 1.8.1.5 Çok Kanatlı Rüzgar Türbinleri

Çok Kanatlı rüzgar türbinler (rüzgargülleri), rüzgar türbinlerin gelişmemiş ilk örnekleridir. Geçmişten günümüze tarım amaçlı su pompalamasında kullanılan bu rüzgar türbinleri, bu işlemdeki moment gereksiniminin karşılanabilmesi amacıyla, çok kanatlı olarak üretilmiştir. Çok kanatlı rüzgar türbinleri düşük hız değerlerinde çalışabilirler. Türbinde bulunan kanatlarının genişlikleri, pervanenin merkezinden uçlarına doğru gidildikçe artış gösterir. Pervane mili, doğrudan dişli kutusuna bağlanarak, generatör miline uygulanan devir sayısı arttırılmış olur ve kara taşıtlarında uygulama alanı bulan şarj generatörleri kullanılan modeller arasındadır. Rüzgar gülleri, rüzgargülü pervane düzleminin rüzgar hız vektörünü her zaman dik olarak alabilmesi için de, rüzgar gülü yönlendiricisi taşımaktadırlar (Nurbay ve Çınar, 2005).



Şekil 1.4 Çok Kanatlı Rüzgar Enerji Türbini (Avcı ve ark., 2015)

### 1.8.2 Dikey Dönüş Eksenli Rüzgar Enerji Türbinleri

Dönme eksenleri rüzgar yönüne dik ve düşey olan bu türbinlerin kanatları da yatay eksen üzerine kuruludur. Dikey dönüş eksenli rüzgar türbinleri rüzgarı her açıdan alabilme edebilme yeteneğine sahiptir. Bu türbinler rüzgarı sürüklerler ve ya kaldırırlar. İlk hareket işlemi zordur ve geçişleri güvenilir değildir. Bu türbinlerin verimi yaklaşık 35% seviyelerindedir. Dikey dönüş eksenli türbinlerin generatör ve dişli kutusu toprak üzerine kurulabildiğinden kule ve nacelleye gereksinim

duymazlar. Bu sebeple düşük rüzgar hızlarında çalışmak zorunda kalırlar ve yatay mekanik aktarım organına ihtiyaçları yoktur. Alçak rüzgar hızlarını kullanmak ve tarlalar için su pompalayarak ihtiyaç gidermek için tasarlanmışlardır. Kanat sayısının artırıldığında oluşacak malzeme ağırlığını da yanında getirmiş olur. Bu yüzden, yüksek rüzgar hızlarında ağırlıktan dolayı düşük verim seviyelerinde çalışır. Rotor miline bağlı kanatların çapı 5 metre olan türbinden yaklaşık 0.5 kW güç elde edilir. Bu türbinleri yer yüzeyine bağlayabilmek için çelik halatlara ve rotor milinin yere sabitlemeye gereksinim duyulmaktadır.

### **1.8.2.1 Savonius Rüzgar Türbinleri**

Savonius Rüzgar türbin, 1925 yılında Finlandiyalı mühendis Sigurd J. Savonius tarafından keşfedilmiştir. İki yatay disk arasına yerleştirilmiş ve merkezleri birbirine göre simetrik olarak kaydırılmış, “kanat” adı verilen iki yarım silindirden oluşmaktadır. Belirli bir hız değerlerinde gelen rüzgarın etkisiyle, çarkı oluşturan silindirin dış kısmında negatif ve iç kısmında pozitif bir moment oluşturur (Ushiyama ve Nagai, 1988). Eğer pozitif moment, negatif momentten daha büyük ise dönüş hareketi pozitif moment yönünde gerçekleşmiş olur (Ushiyama ve Nagai, 1988). Diğer dikey eksen rüzgar türbinlere göre; düşük rüzgar hızlarında iyi kalkış ve sürme karakteristiğine sahip olması, yapımının kolay ve tedarik sürecinin ucuz olması, rüzgarın yönünden bağımsız olması ve en önemlisi kendi kendine ilk harekete başlaması gibi birçok üstünlüklere sahip olan Savonius Rüzgar türbinlerinin, aerodinamik performansı düşük olduğu için ilk uygulama alanları; havalandırma, su pompalama gibi kısıtlı alanlar olmuştur. Savonius Rüzgar türbinin birçok üstünlüğü bulunmasına rağmen, aerodinamik performanslarının düşüklüğü nedeniyle kullanılmamaktadır. Son yıllarda yapılan Savonius Rüzgar türbin çalışmaları, aerodinamik performansın geliştirmesi yönünde olmuştur (Newman, 1974; Modi ve Fernando, 1989). Aldoss ve Najjar, bu çarkın performansı üzerine; “sallanan kanatlı çark” kullanarak deneysel bir çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında Savonius Rüzgar türbininin performansını, hem rüzgarın gerisinde hem de rüzgara doğru, çark kanatlarının bir optimum açı ile geriye doğru salınmasına müsaade ederek geliştirmişlerdir (Aldoss ve Najjar, 1985). Reupke ve Probert, Savonius Rüzgar türbinin çalışma etkinliğini arttırmak için, türbin kanatlarının kavisli kısımlarının yerine bir sıra menteşelenmiş kanatçıklar yerleştirmiştir. Kanatçıklar

rüzgara doğru ilerlerken, rüzgar basıncının etkisinde otomatik olarak açılmış ve daha az akış direnci elde edilmiştir. Kanatçıkların ilk konuma gelirken, tekrar otomatik olarak kapandığını tespit edip, çok düşük uç hız oranlarında, düzeltilmiş parçalı kanatlı çarklardan, klasik Savonius Rüzgar türbinlerine oranla daha yüksek momentler elde edildiğini belirlemişlerdir (Reupke ve Probert, 1991).

### **1.8.2.2 Darrieus Rüzgar Türbinleri**

Darrieus rüzgar türbinleri Fransız mühendis George J.M. Darrieus tarafından 1931 yılında icat edilmiştir. 1970 ve 1980 yıllarında Amerika ve Kanada da Darrieus türbinlerinin kanat dizaynları üzerine geniş çalışmalar gerçekleştirilmiştir (Modi ve Fernando, 1989). Kanatlar için yerleşim planlaması yapılırken geometrik temelli aerodinamik hesaplama işlemi güçlü olduğu için bu türbinler yüksek performansa sahiptir. Kanatların rotor milinden uçlara doğru gelen hafif eğim sayesinde kanatlarda oluşan rüzgar bükme ve çekme gerilimleri minimum değerde seyrederek. Yüksek hızlarda çalışabilir ve türbin genellikle 2 veya 3 kanatlı tasarlanır. İlk hareket için Savonius Rüzgar türbin veya bir kalkış motoruna ihtiyaç duyar.

### **1.8.2.3 H-Darrieus Rüzgar Enerji Türbinleri**

Dikey eksen olarak tasarlanmış en önemli Rüzgar türbini tasarımlarından biridir. Darrieus rüzgar türbininin geliştirilmesiyle meydana gelen daha karmaşık tipte bir rüzgar enerji türbinidir. Darrieus rüzgar türbinden iki önemli notalarda farklılıklar yaratır.

Bunlar:

- Düz bir aerodinamik profile sahiptir.
- Kanatlarda pitch kontrolü uygulaması yapılır.



**Şekil 1.5** Dikey Eksen verimli Rüzgar Enerji Türbini Modelleri (Avcı ve ark., 2015)

### **1.8.3 Eğik Dönüş Eksenli Rüzgar Enerji Türbinleri**

Dönme eksenleri düşeyle, rüzgar yönünde bir açı yapan Rüzgar türbinleridir. Bu tip türbinlerin kanatları ile dönme eksenleri arasında belirli bir açı bulunmaktadır.

### **1.9 Rüzgar Türbin Tasarımlarının Karşılaştırılması**

Rüzgar enerji santralleri çiftlikleri kurulumunda; rüzgar enerji verimleri, kurulacak alandan ve maddi olarak oldukça yüksek kayıplardan kaçınmak için rüzgar türbinlerin teknik bilgilerine sahip olunmalıdır. Rüzgar türbin tasarımları incelendiği üzere kanat sayıları ve modelleri, rüzgarı alış yönleri, şekilleri ve kullanım yerlerine göre birkaç tasarım modellenerek üretilebilmektedir. Aşağıdaki Çizelge 1.1, Çizelge 1.2 ve Çizelge 1.3’de Rüzgar türbin tasarımlarının birbirleri ile çeşitli teknik bilgileri ve modelleri dikkate alınarak karşılaştırılmaya çalışılmıştır. Bu sergilenen çizelgelerde; türbinlerin kullanım amaçları, bölgedeki rüzgar enerji kapasitesi ve maddi tedarik koşullarına göre nasıl bir türbin modeli seçilmesi gerektiği veya kurulmak istenen Rüzgar enerji türbinin özellikleri görülmektedir. Kurulum yapılacağı coğrafi yapı, yüksek binalar ve bitki örtüsü vb. engeller rüzgar hızının düşmesine etki eden faktörlerin başlıcalarıdır. Rüzgar enerji santralleri düz ve yüksek tepeler, vadi, kanyon ve geçitlerde ise hakim rüzgar yönüne ve tüketiciden uzak olmayacak şekilde konumlandırılmalıdır.

**Çizelge 1.1** Büyüklüklerine Göre Türbinlerin Karşılaştırılması (Nurbay ve Çınar, 2005)

	<b>Kul. Alanı</b>	<b>Tek Türbin Gücü</b>	<b>Üretilen Enerji Kul. Yerleri</b>	<b>Akü İhtiyacı</b>	<b>Bakım Masrafı</b>	<b>Kurulum</b>
<b>Büyük RT</b>	End.	50kW-2MW	Şebeke	Yok	Var	Yüksek
<b>Küçük RT</b>	Kişisel	50W-20kW	Çiftlik evleri, Telekomünikasyon alıcısı, Radyo kulesi, Seralar Acil Tel. vb.	Var	Yok	Düşük

**Çizelge 1.2** Rüzgarı Alış Yönüne Göre Türbinlerin Karşılaştırılması (Nurbay ve Çınar, 2005)

	<b>Yaw Mekanizma İhtiyacı</b>	<b>Kanat Malzeme Yapısı</b>	<b>Kuleye Binen Yük</b>	<b>Rüzgarın Türbine Verdiği Zarar</b>
<b>Rüzgarı Önden Alan RT</b>	Var	Sert	Ağır	Az
<b>Rüzgarı Arkadan Alan RT</b>	Yok	Esnek	Hafif	Çok

**Çizelge 1.3** Kanat Çeşitlerine Göre Türbinlerin Karşılaştırılması (Nurbay ve Çınar, 2005)

	<b>Yatay Eksen Rüzgar Türbini</b>				<b>Dikey Eksen Rüzgar Türbini</b>	
	<b>Tek Kanatlı</b>	<b>2 Kanatlı</b>	<b>3 Kanatlı</b>	<b>Çok Kanatlı</b>	<b>Savonius</b>	<b>Darrierus</b>
<b>Maliyet</b>	Yüksek	Yüksek	Düşük	Düşük	Düşük	Düşük
<b>Estetik Görünüm</b>	Kötü	Kötü	İyi	İyi	İyi	İyi
<b>Gürültü</b>	Yüksek	Yüksek	Düşük	Az	Az	Az
<b>Çalışma Hızı</b>	Yüksek	Düşük	Yüksek	Düşük	Düşük	Düşük
<b>Kule ihtiyacı</b>	Var	Var	Var	Var	Yok	Yok
<b>Kullanım Amacı</b>	Elektrik	Elektrik	Elektrik	Az Elekt. & Su pomp.	Az Elekt. & Su pomp.	Az Elekt. & Su pomp.
<b>Günümüzde Kullanımı</b>	Yok	Yok	Var	Var	Az	Az
<b>Rotorun Dönmesi İçin Rüzgarı</b>	Kaldırır	Kaldırır	Kaldırır	Kaldırır & Sürükler	Kaldırır & Sürükler	Kaldırır & Sürükler



Kanat yerleşimi ve kanat modelleri ise en az rotor miline bağlı kanatların yerden 3 metre yüksekte olması ve yerleşim yerlerinde ve ya insan faktöründe 40 metre uzakta olması avantajdır. Rüzgar enerji üretim çiftliklerinde yapılan düzenlemelerde her bir rüzgar enerji türbini, rüzgarı en iyi alacak şekilde ve birbirlerinin arkasına denk gelmeyecek şekilde, gölgeleme etkisinden en az etkilenecek şekilde yerleştirilmesine dikkat edilmelidir.

## 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Literatür taraması yapılırken, gerçekleştirilecek olan çalışmanın temelini oluşturacak rüzgar temelli enerji kaynaklarına katkı sağlamak amaçlanmıştır. Günden güne artan enerji ihtiyacı ve geleneksel yöntemlerin pahalı olması ve çevreye olan zararı neticesinden başka eğilimler göstermektedir. Bahsi geçen enerji kaynaklarında 2 sınıfa ayırabiliriz. Bunlar petrol, doğalgaz, kömür gibi enerji kaynakları sonlu enerji olarak sayılırken; biyomass, jeotermal, gel git enerjisi, güneş ve rüzgar enerjisi gibi kaynaklar yenilebilir enerji kaynakları olarak sınıflandırılabilir (Doğanay ve Coşkun, 2017). Yenilenemeyen ve yenilenebilen enerji kaynaklarının olumlu ve olumsuz yönleri üzerine yapılan çalışmalar akademik ve piyasa çalışmaları sonucunda, yenilenemeyen kaynakların çevreye yapmış olduğu etki ve yenilebilir kaynakları kullanmanın gelişmiş ülkelerin ekonomisine vermiş olduğu katkı ve dünya üzerinde ki oluşmuş etkilerinin olmaması göz önüne alındığında, yenilenebilir kaynaklara yönelmesinin gerekliliği bir kez daha vurgulanmıştır (Kılıç ve Aslan, 2017). Bu çalışmada da rüzgar kaynaklı enerji üretim metotları üzerinde durulmuştur ve piezoelektrik kristallerinden enerji üretimi üzerine çalışma gerçekleştirilmiştir. Piezoelektrik malzemeler bileşen olarak ve ya tasarlanmış sensör yapıları olarak birçok çalışmada kullanılmaktadır (Glynne-Jones ve ark., 2004). Güncel deneyler, hassasiyet gerektiren ortamlar, uzay çalışmaları, yüksek basınç ve manyetik alanlarda çalışmasından ve performansından bir şey kaybetmeyen piezoelektrik, Elektrik üretimi konusunda da deneysel çaplardan üretim aşamasına yavaş yavaş geçiş yapmaktadır (Ju ve Ji, 2018). Bahsi geçen bilimsel çalışmalarda da üretim aşamasına geçmek için kullanılacak olan en iyi modeller ve bu modellerde yaşanacak olan kıstaslar test edilmektedir. Öte yandan ezelden beri gelen bazı piezoelektrik uygulamaları mevcuttur. Yapılan incelemeler sonucunda; yayınından da bir çok bilimsel çalışmalardan bahsedilmiştir. Buna örnek olarak ta 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 (Büyükköskin, 2018).

Bu piezoseramik tarama tüplerinin yüksek hareket kabiliyeti ve hassasiyeti ile karar verme koşullarında diğer sistemlere göre oldukça fazla avantajlıdır. Hareket kabiliyetleri katı hal etkilerine fazlası ile dayandığından birkaç mikro saniye içinde yanıt verme sürelerini sahipken, birkaç pikometreden kısa sürede de bir konumun çözünürlüğünü çok kısa sürede elde etmek için üst düzey bir verime sahiptir. Yer değiştirmek için kullanılan çözünürlük değerleri birkaç mikron arasında gidip gelmektedir. Atom kuvvet mikroskobu dokunmasız modda (nc-AFM) oluşturulan etkileşimli çalışmalar için plakalar ve ya diskler gibi piezoseramik elemanları ölçme esnasında dinamik titreşim elde etmek için ölçüm konsolunun önüne yerleştirilir (Demir, 2017).

Bu ölçümlerde AFM'nin ucu ölçüm alanının üstünden birkaç nanometre kadar yukarıda konumlandırılır fakat ölçüm alanına dokunmaz. Bu yöntem ile atomik yapıların bile resimleri, 3D modellerini ve ya grafik dökümlerini oluşturmak için veri güvenilirliği altında gerçekleştirilebilir. DESY (German Electron Synchrotron)'daki parçacık hızlandırıcısı XEFL, rezonatörler(ses ayarlayıcıları) veya boşluklar olarak adlandırılan süper-iletken ivme yapılarına dayalı ivme teknolojisini kullanmaktadır. Lineer bir çarpıcı TESLA (Tera Elektron Volt Enerjisi Süper İletken Doğrusal Hızlandırıcı) için geliştirilmiş olan bu teknoloji ile çok ufak bir giriş kesit alanına ve yüksek foton enerjisine sahip bir parçacık denetiminin üretilmesine olanak tanımaktadır. Bir diğer dikkat edilmesi gereken konu ise ivme alanının gücünün devamlı olarak yüksek seviyede tutmak gereklidir (Türker, 2009).

Çok katmanlı piezoseramik aktüatörün dış katlarında ölçülen değer yaklaşık 4 Kelvin olduğunda doğrudan çalışmaya başlarlar. Bu sıcaklık değerlerinde aktüatör yer değiştirmesi oda sıcaklığından daha alt seviyelerdedir (Shan ve ark., 2015). Radyasyonlu ortamda radyasyona maruz bırakılan bu kriyojenik ortamlarda piezoelektrik kristaller yaklaşık 20 yıla kadar uzun bir kullanım süresi boyunca kesintisiz çalıştırılabilir. Uzun süreler boyunca, sık tekrarlanan periyotlarda

güvenilir ölçümler yapabilmek, bu tür çok yüksek maliyetli projeler için aranan olmazsa olmaz çok önemli bir özelliktir (Taya, 2005; Topolov ve ark., 2014).

NASA; Mars üzerinde yaptığı araştırmalarda kullanmak üzere tasarladığı cihazlarda piezoelektrik seramikleri kullanarak daha dayanıklı ve kullanılabilir hael getirmiştir. Piezoseramik hareket kontrol mekanizmaları NASA uzay görevine çıkmadan önce kapsamlı bir şekilde düzinelerce testler ile denenmektedir (Tani ve ark., 1998). Özellikle piezoseramik aktüatörlerin kullanım süreleri teste tabi tutulmuştur. Bu testler esnasında yapılan devir testlerinden piezoseramik malzemeler 100 milyar devir ile performans testinde özelliklerinden bir şey kaybetmeden testte istenilen başarıyı elde etmiştir. Bu performans Marsta kullanılacak olan cihaz kullanım ömrü için uygun değerlerdir. Farklı ölçümler alacak sensörler, minerolojik ve kimyasal testleri Mars yüzeyinde bulunan kayalar üzerinde sürdürmektedir. Her bir katmanından elde diledik tozlar ile farklı barklı numuneler toplanacaktır (Newman, 1974; Patel ve Uzun, 2011). Fakat bu numunelerin sınıflandırılması ve ayrıştırılması için parçacık boyutları veya yoğunluğa göre 0.9- 2.2 kHz aralığında farklı frekans genliklerde titreşim seviyeleri uygulamaktadırlar (Sodano ve ark., 2004; Song ve ark., 2015). Bu işlemi gerçekleştirmek için çok tabakalı piezoseramik hareket mekanizmaları yardımı ile yapılır. Belli frekansta değeri aralıklarında malzeme seçime ve beslemesi için gerekli titreşimler gerçekleştirmiş olurlar. Çok katmanlı piezoseramik hareket mekanizmaları seramik kaplama ile yalıtımları ile uygulama alanında yaşanan koşullarında mutlak sıfır ve aşırı vakuılamaya karşı ideal bir çalışma performansı sergilemektedirler. Bu koşullarda sentetik malzemelerin karakteristikleri farklıdır ve nasıl bir hal alacakları duruma göre değişkenlik göstermektedir. Bu durumda sentetik malzemeler çok uzun zaman periyotlarında hassas ve döngüsel ölçüm almak için uygunluk teşkil etmemektedir. Bütün bu çalışmalar ve araştırmalar neticesinde bu sentetik malzemelerin yerine piezoseramik malzemeler tercih edilmektedirler (Büyükketin, 2018).

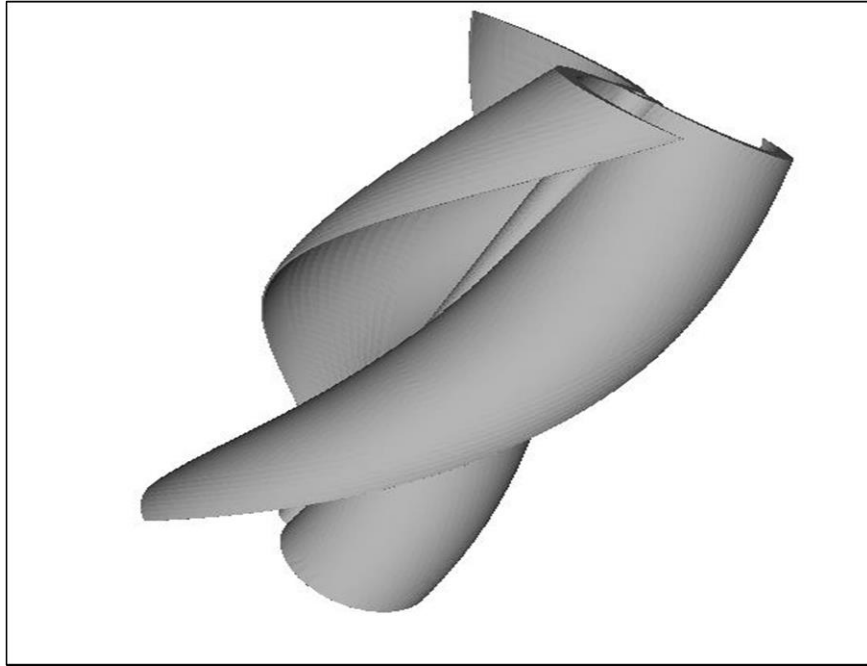
### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

#### 3.1 Giriş

Bu çalışmadan piezoelektrik malzemelerin elektrik üreticileri olarak kullanılabilme potansiyelleri incelenmiştir. Rüzgar enerji santralleri kanat yapıları baz alınarak en iyi verim elde edilen kanat tipi seçilerek bu yapıya uygun kanat yapısı tasarlanarak 3 boyutlu yazıcı ile modellenen yapı oluşturulmuş ve laboratuvar ortamında rüzgar tüneli yapısı oluşturularak test edilmiştir.

#### 3.2 Deneysel Yöntem

Bu çalışmadan piezoelektrik maddelerin elektrik üretici olarak kullanımı için bir 3 boyutlu dikey eksen helis yapılı üç kanatlı bir yapı modellenmiştir. Bu modelleme işleminin ardından Şekil 3.1’de görüleceği gibi helis kanatlı dikey eksen rüzgar terminali oluşturulmuştur.



**Şekil 3.1** 3 Kanatlı, Dikey Eksen Rüzgar Hasat Kanatları Modeli

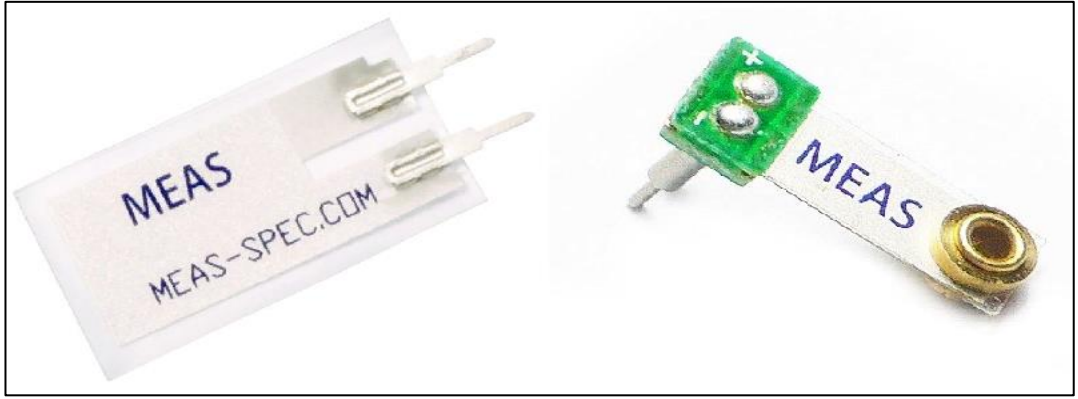
Bu kanat yapısındaki amaç  $120^0$  derecelik açılar ile yerleştirilen kanatlar rüzgar yönü fark etmeksizin en güçlü yönden gelen rüzgarı elips yapılı kanatlarının içinde toplayarak ortasındaki dikey eksen yönünde yukarıya taşıyacaktır. Kanatların üzerine yerleştirilen piezoelektrik sensör ile bu rüzgarın girişi ve çıkışı sırasındaki titreşimden ve basınçtan faydalanarak elektrik enerjisi dönüşüm işlemi gerçekleştirileceği öngörülmektedir.

### 3.3 Deney Materyalleri

Deney ve veri toplama aşamasında kullanmış olduğumuz test cihazlarını hakkında bilgileri inceleyecek olursak.

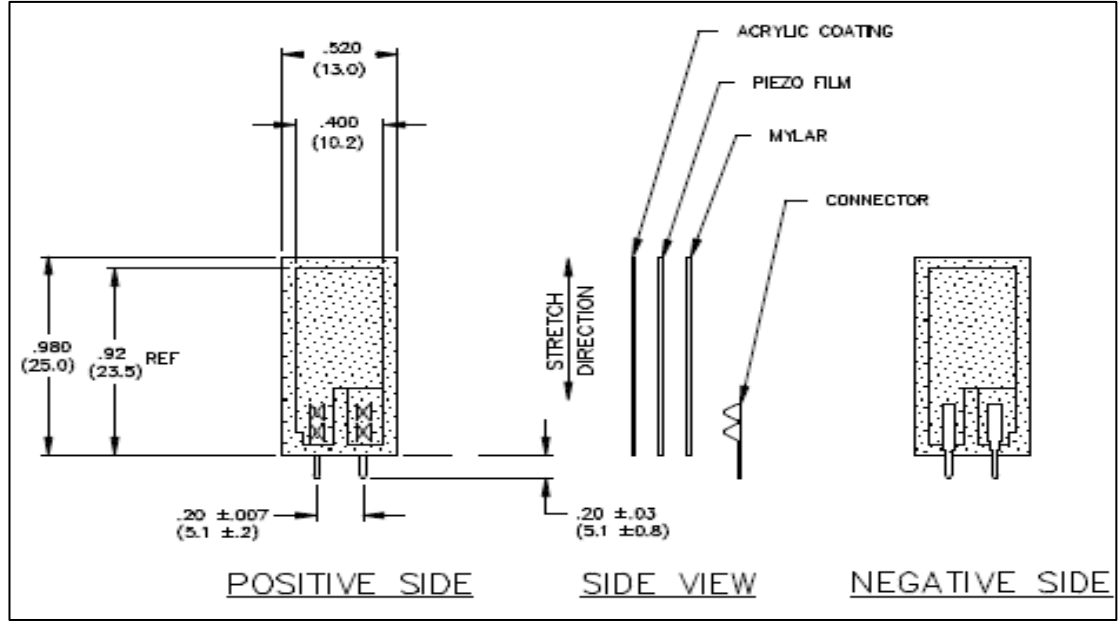
#### 3.3.1 Piezoelektrik Film

Test esnasında iç piyasada ve ya dış piyasada tasarıma uygun titreşim temelli enerji üretebilecek piezoelektrik kart araştırılması yapılırken; film formuna sahip iki model tespit edilmiştir. Tespit edilen modeller Şekil 3.2’de gösterildiği gibi kurlun kütleli ve kütsüz olmak üzere bulunduğu tespit edildi (Hasler ve Stein, 1984).



Şekil 3.2 Kütleli ve Kütsüz Piezoelektrik Titreşim Kartları (Anonim, 2014c; Anonim, 2008)

Yapılan incelemeler neticesinde ürünlerin üretici firmaları tarafından oluşturulmuş olan datasheet’leri incelendiğinde kütsüz film formuna sahip olan titreşim kartı tercih edilmiştir. Çünkü diğerinin üzerinde bulunan kurşun kütle yüksek basınç ve frekansa sahip rüzgârlarda filmin içinde bulunan piezoelektrik kristallerinin zarar görebileceği belirtilmektedir (Anonim, 2015). Tercih edilen piezoelektrik titreşim kartından bahsedecek olursak. 2 adedi yedek olmak üzere 32 adet piezoelektrik titreşim kartı sipariş edilmiştir. Tedarik sürecinin kısa olması ve yurtdışı piyasaları ile arasında yok sayılabilecek bir fiyat farkı olması sebebi ile iç piyasadan temin yoluna gidilmiştir. Kullanılan piezoelektrik titreşim kartlarının teknik özelliklerinden bahsedecek olursak; Titreşimin durumuna göre 7 Volt ile 70 volt arasında gerilim üretebilen piezoelektrik sensör Şekil 3.3’de görüleceği gibi 25mm ve 13mm ebatlarındadır ve akrilik ve plastik kaplamalarla piezo malzeme sıvı izolasyonu gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.3 Piezoelektrik Titreşim Kartı Teknik Çizimleri (Anonim, 2014c)

Çizelge 3.1 Salınım mesafelerine göre üretilen gerilim

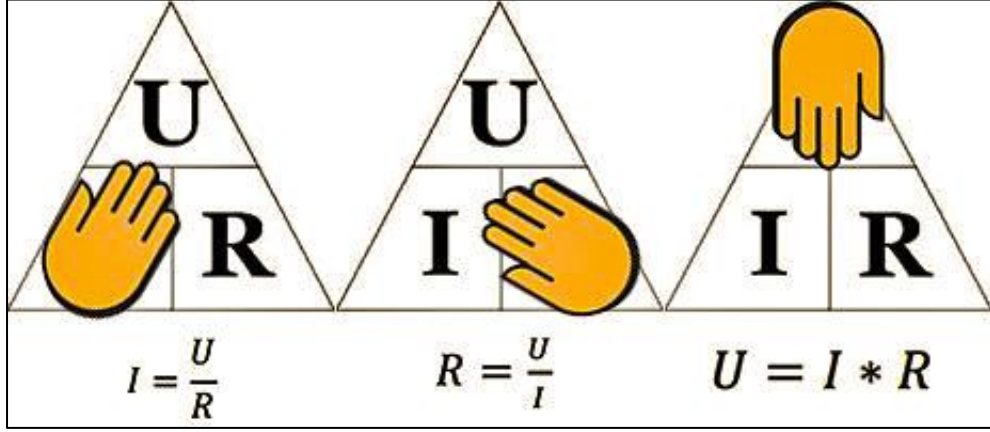
Film Salınım Mesafesi	Şarj Çıkışı	Gerilim Çıkışı
2 mm	3,4 nC	7 V
5 mm	7,2 nC	15 V
10 mm	10-12 nC	20-25 V
Max (90 <sup>0</sup> )	>30 nC	~70V

### 3.3.2 PLA Hammaddeli 3 Boyutlu Yazıcı

Tasarlanmış olan rüzgâr enerji modelinin meydana gelmesi için 3 boyutlu yazıcı kullanılmıştır. İlk etapta Solidworks 3 boyutlu tasarım programı ile tasarım oluşturulmuş ardından STL uzantısına çevrilerek kaydedilmiştir. İmalat için Canik Mesleki ve Teknik Anadolu lisesinde bulunan 3 boyutlu yazıcılar kullanılmıştır. Tasarım oluşturulurken 3 boyutlu yazıcıların yazma alanları dikkat edilerek 20cm x 20cm taban ölçüleri ve 30 cm yükseklik ölçüsü içerisine sığacak şekilde kanat ölçüleri ölçeklendirilmiştir. Ölçeklendirme mm cinsinden oluşturulmuştur.

### 3.3.3 Piezoelektrik Doğru Gerilim Hasat Kartı Tasarımı

Piezoelektrik maddelerin titreşim ve basınçla beraber oldukça düşük akım değerlerine sahip alternatif gerilim üretmektedir. Temel olarak devre tasarımlarında oldukça büyük bir gerilim elde edilerek ohm kanunu denkleminde göre Şekil 3.4'de gerilim değeri düşürülerek yüksek akım değerlerine çıkmak amaçlanır.

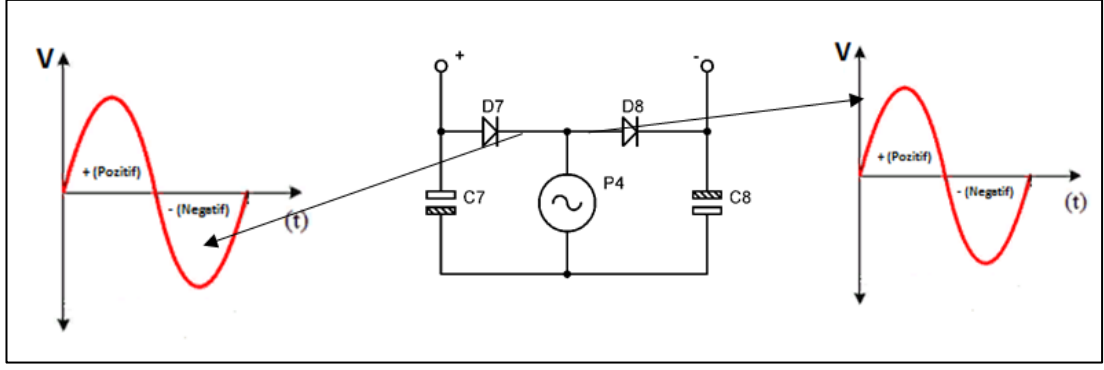


Şekil 3.4 Ohm Kanunu

Bu kanuna göre; elde edilen gerilim değeri sabit direnç altında düşürüldüğünde akım değerinin yükselmesi beklenmektedir. Tabii bu işlemi gerçekleştirmek için depolanmış bir gerilim değerine ihtiyacımız vardır. Gerilimlerin muhteviyatı gereği Alternatif gerilimi depolama şansımız yoktur. O yüzden piezoelektrik sensörden elde edilen AC gerilimi bir AC-DC dönüşüm kartı tasarlanarak depolama ünitesine DC gerilim olarak yönlendirmek daha mantıklı olacaktır. Böylelikle hem verim yüksek olacak ve üretilen gerilimin yönlendirilmesi ve kullanımı daha kolay olacaktır.

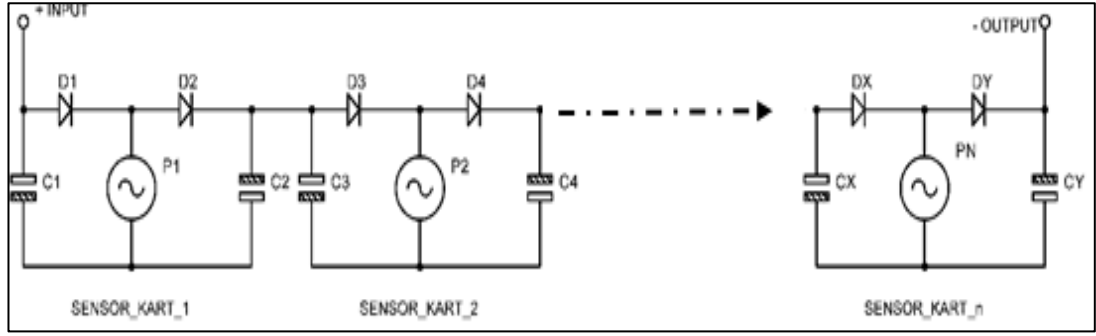
Kart tasarımında temel olarak kapasitör ile AC gerilimi DC gerilime dönüştürme işlemi yapılmaktadır. Detaylı bir şekilde devre çalışmasını anlatacak olursak. AC gerilim pozitif saykılta iken Şekil 3.5'de bulunan D2 diyotu üzerinden geçerek C2 kondansatörünü şarj etmektedir. AC gerilim negatif saykılta iken D1 diyotun iletimde olacaktır ve C1 kondansatörü şarja geçecektir ve şarj esnasında C2 kondansatörü deşarja geçecek ve çıkışlarda devamlı pozitif gerilim görülecektir. Tekrar saykıl pozitif pozisyona geçtiğinde C1 kondansatörü deşarja geçecek ve üretilen AC gerilim DC gerilime dönüştürülmüş olacaktır.





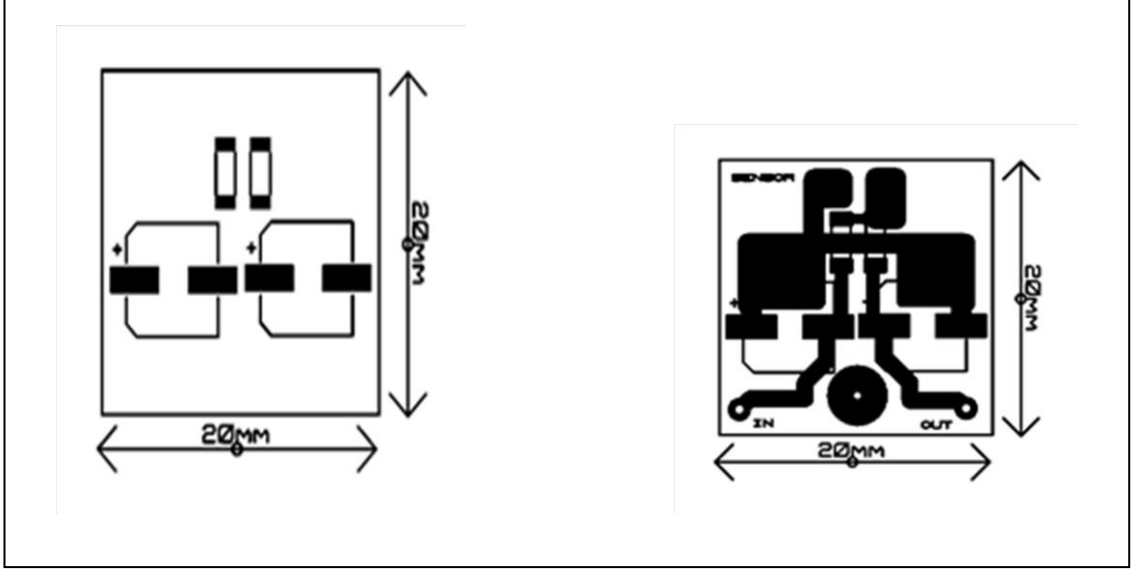
**Şekil 3.5** Piezoelektrik Hasat Kartı Çalışma Prensibi

Oluşturulan piezoelektrik sensör kartı tasarımının seri gruplar halinde bağlanarak üretilen gerilimin DC(Doğru akım) olarak toplanması esasına dayanarak bir elektrik üretimi gerçekleştirilir. Şekil 3.6’da ise bu hasat kartının seri grup bağlantı şeması gösterilmiştir.



**Şekil 3.6** N Adet Piezo Kart ile Oluşturulmuş Seri Gruplama

Yapılan tasarım ve test aşamasından sonra devrenin ne kadar küçültülebileceği hesaplanarak bütün sensör ve küçük devrelerde kullanılan yüzey dokunmalı(SMD) elektronik devre elemanları kullanılmıştır. SMD elemanlarının kullanılmasının sebebi ise küçük boyutlara indirilebileceği ve bacaklı elamanlara göre bacak yapısından doğabilecek direncide minimuma indirmiş olacağız. Paralel testlerde ise iki devre kartı arasında 2V-3.2V arasında gerilim farkı olduğu gözlemlenmiştir. Tasarım programı olarak; hem simule edebileceğimiz hemde devre oluşturmadan önce hataları gözlemleyebileceğimiz PROTEUS ISIS/ARES programı kullanılmıştır. Boyut olarak Şekil 3.7’de görüleceği gibi 20mm x 20mm gibi bir devre oluşturularak inilebilecek minimum devre boyutuna inilmiştir.



Şekil 3.7 Sensör Devresi Yolları ve Üst Görünüş

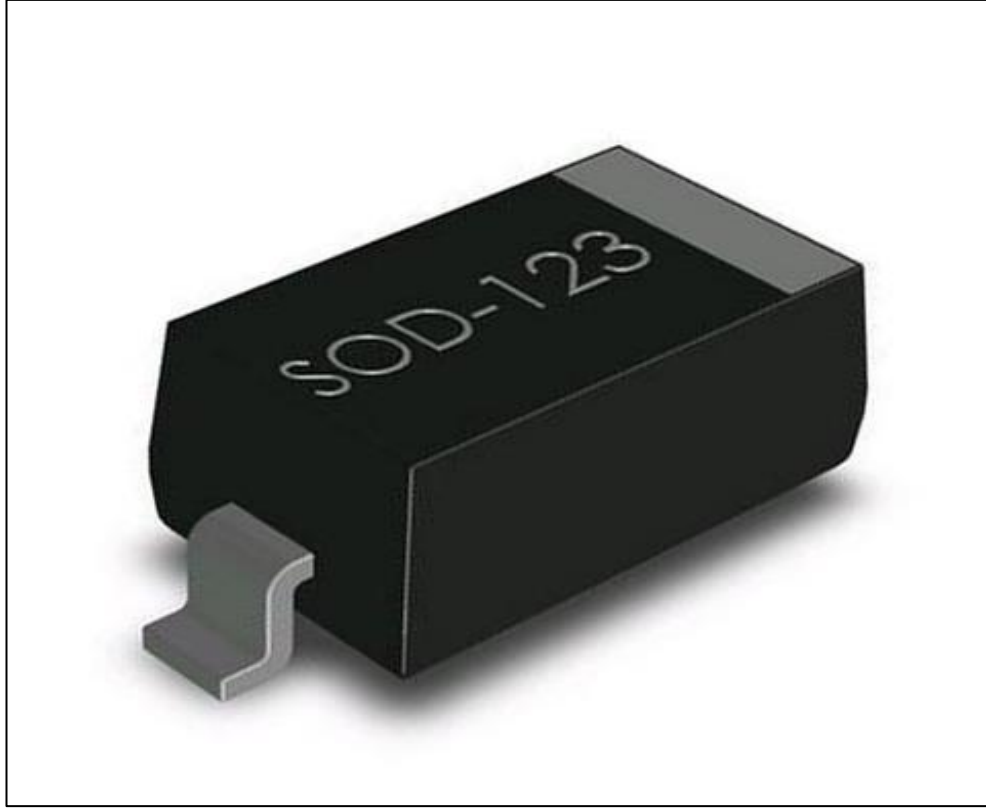
### 3.3.3.1 Devre Tasarımında Kullanılan Elektronik Devre Elemanları

#### 3.3.3.1.1 MBR0560 0.5A 60V Schottky Diyot

SOD123 yüzey dokunmalı kılıf yapısına sahip olan Schottky diyot seçilmesinin başlıca sebebi 0.45 Volt tan itibaren iletme geçiyor olmasıdır. Çünkü seçilen diyor ne kadar küçük gerilim değerlerinde iletme geçerse gerilim kaybı minimum düzeyde olacaktır. Gerilim maksimum gerilim değerinin 60V olması ise piezoelektrik titreşim kartlarından gelecek olan gerilim değerini kayıpsız taşıyabileceği için seçilmiştir (Anonim, 2012).

#### 3.3.3.1.2 22uF 16V SMD Elektrolitik Kondansatör

ELEC-6.3 kılıf yapısına sahip olan elektrolitik kondansatör 16v değerine kadar şarj alabilmektedir. Kapasite olarak 22uF (mikro farad) seçilmesinin sebebi piezoelektrik malzemedan gelen enerji titreşimle doğru olarak frekansın oldukça fazla oluşu yani pozitif alternansdan negatif alternans a geçişin hızlı olması sebebi ile kapasite düşük tutulup Alternatif gerilimden, doğru gerilime geçişin eksiksiz ve birbirini tamamlar seviyede olması sağlanıyor (Anonim, 2010a).



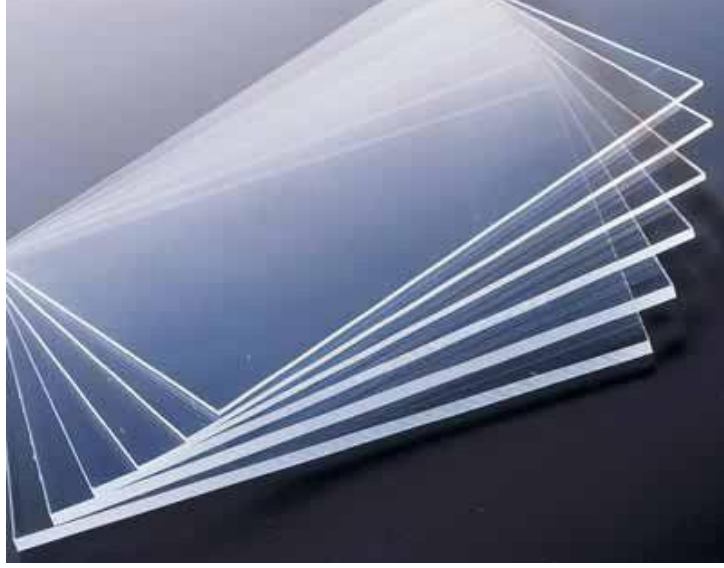
**Şekil 3.8** 0.5A 60V YüzeY Dokunmalı Shottky Diyot (Anonim, 2012)



**Şekil 3.9** 22 mikro Farad 16 Volt YüzeY Dokunmalı Kondansatör (Anonim, 2010b)

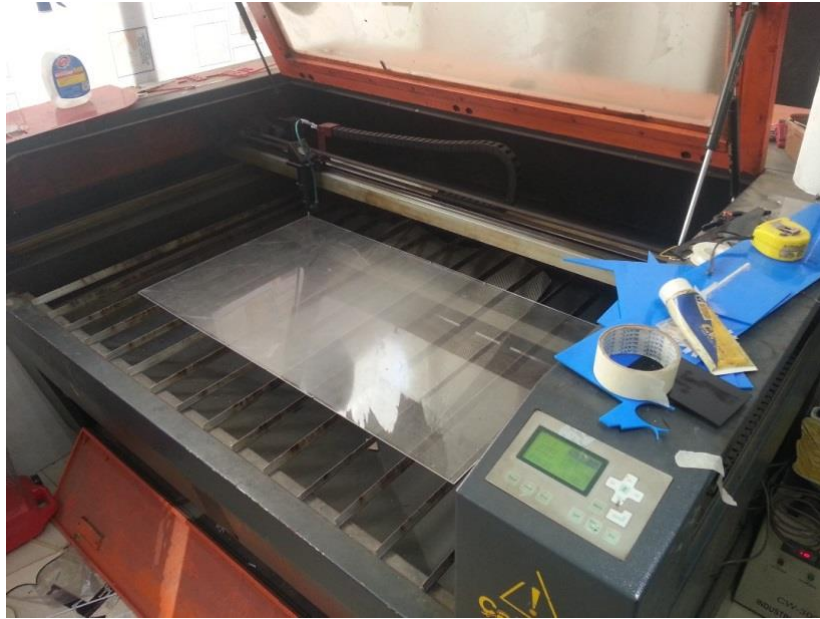
### 3.3.4 Rüzgar Tüneli

Radyan Fan ile rüzgar kaynağı oluşturularak Şekil 3.10’da görülen Pleksiglas malzeme ile rüzgar tüneli oluşturulmuştur.



Şekil 3.10 Pleksiglas Tabaka (Anonim, 2017a)

İlk olarak tasarlanan rüzgâr tüneli lazer kesim cihazı ile parçaları oluşturulmuştur, lazer kesim cihazı Şekil 3.11’de görülmektedir. Lazer kesim cihazı ile 3 boyutlu tasarım ortamında oluşturulan parçalar hatasız bir şekilde kesilmektedir. Kesim işleminin ardından parçalar bir araya getirilerek rüzgar tüneli oluşturulmuştur.



Şekil 3.11 Lazer Kesim Cihazı

Şekil 3.12’de radyan fan motorunun çıkışına göre ayarlanarak tünel içerisine rüzgâr olukları yerleştirilmiştir. Rüzgâr tüneli ile radyan motor birleşim noktasından itibaren tünel içinde rüzgâr olukları oluşturularak rüzgâr dengeli bir şekilde sistem üzerine yönlendirilmektedir.



**Şekil 3.12** Rüzgar Tünelinin Radyan Motora Yerleşimi

Rüzgâr seviyeleri için ise radyan motor 220 volt alternatif gerilim altından çalıştığı için Şekil 3.13’de görülen Dimmer motor hız kontrol devresi kullanılmıştır. Kullanılan Dimmer devresi 2000 Watt güce sahip olup, kullanılan radyan motor için ideal seviyelerdedir. Hız testlerine göre de en dengeli şekilde 7 kademedeki rüzgâr hızı elde edilmiştir.

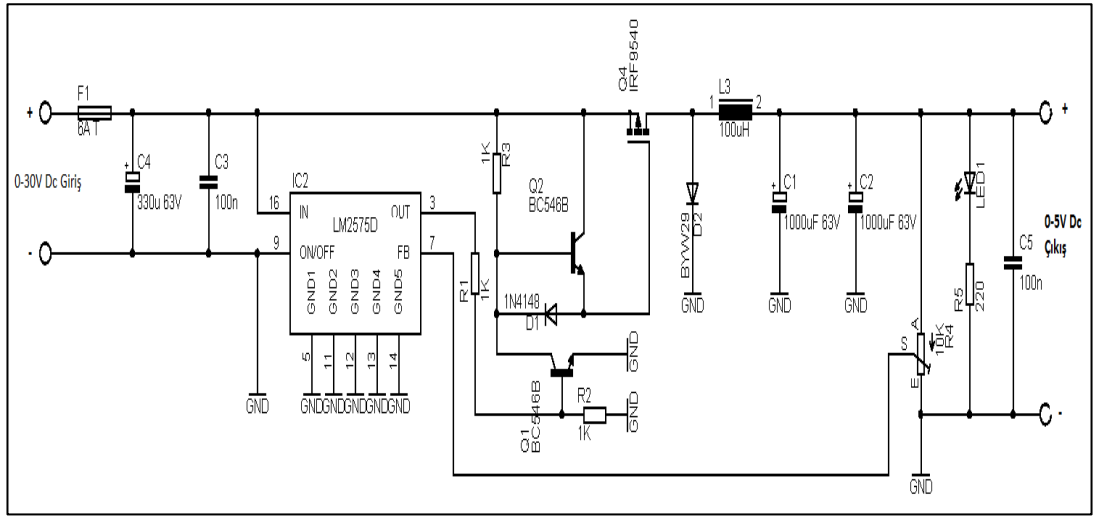


**Şekil 3.13** Dimmer Motor Hız Kontrol Devresi (Anonim, 2014a)

### 3.3.5 Step Down (Buck Converter) Gerilim Düşürücü Devresi

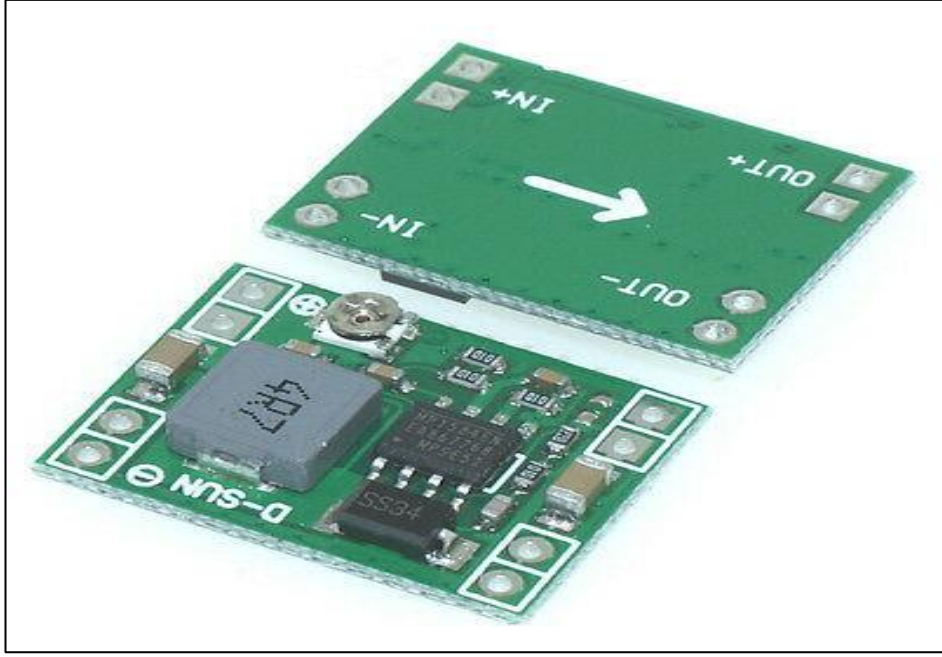
Gerilim düşürücü devresi Rüzgâr enerjisi altından elektrik enerjisi üreten piezoelektrik titreşim üreteçlerinden gelen gerilimi kullanılabilir seviyelere indirmek amaçlı kullanılan devredir. Şekil 3.14’de kullanılan step down DC gerilim düşürücü devresinin açık şeması görülmektedir.

Bu devreye göre LM2575D gerilim bölücü entegresi üzerinde gerilim düşümü işlemi yapılmaktadır. Gerilim bölücü entegrenin çıkışı IRFZ9540 mosfetinin drain ucunu tetikleyerek çıkışta görülmesi gereken gerilim değeri ayarlanabilmektedir.



Şekil 3.14 Step Down Gerilim Düşürücü Devresi Açık Şeması

Oluşturulan şemanın Proteus/ISIS programı ile simülasyonu gerçekleştirildikten sonra devre tasarım aşamasına geçilmiştir. Fakat yapılan piyasa araştırmasına göre devre malzemesi temini ve fiyatları hazır olarak satılan step down DC gerilim düşürücü devrelere göre zor olduğu tespit edildi. Yapılan çalışma sonucunda 3.15’de görülen 0.8-20 V Doğru gerilim giriş değerlerine sahip, maksimum 3 Amper seviyelerinde akım taşıyabilen Frekans olarak da 1 MHz seviyelerini destekleyen IFT00066-2 kodlu Step down DC-DC konverter devresi kullanılmıştır.



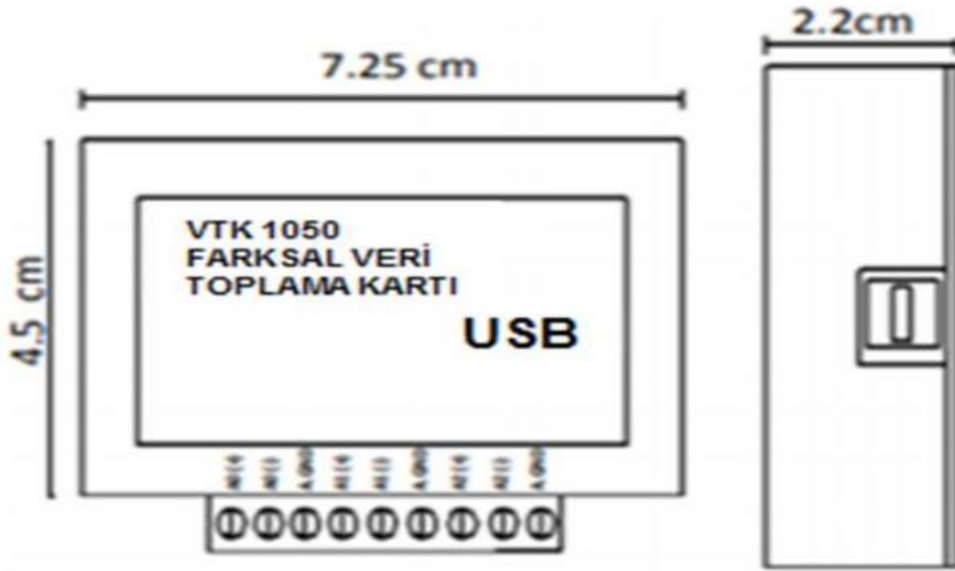
Şekil 3.15 Step Down DC-DC Gerilim Düşürücü Devresi

### 3.3.6 VTK 1050 3 Kanal Analog Veri Toplama Kartı

“VTK 1050” olarak satışa sunulan, 3 kanal, farksal ölçüm yapan analog giriş kartı, 1050 örnek/saniye hızla veri toplayabilmektedir. Windows işletim sistemiyle uyumlu olan VTK 1050 ürünü, LabVIEW yazılım dili ile uyumludur. VTK 1050 ürününün bilgisayarla haberleşmesi USB ile gerçekleşmektedir. VTK 1050, LabVIEW uyumluluğu olan, kütüphanesinde bulunan mevcut ara yüzü sayesinde, verileri anlık olarak görüntüleyen ve istenildiği takdirde Microsoft Office ortamında kayıt altına alan VTK ürün ailesidir. VTK 1050 ürünü, topladığı verileri görselleştirmenin yanında seçilen örnek sayısına göre verileri analiz edebilir ve raporlanabilmektedir. Daha sonra toplanan verinin analizleri yapılarak grafikler gösterimi gerçekleştirilecektir. Toplanan veriler bu sayede kayıt altına alınarak sistemin ve piezoelektrik malzemenin karakteristikleri çıkarılabilecektir.



Şekil 3.16 VTK 1050 Modeli Analog Veri Toplama Kartı



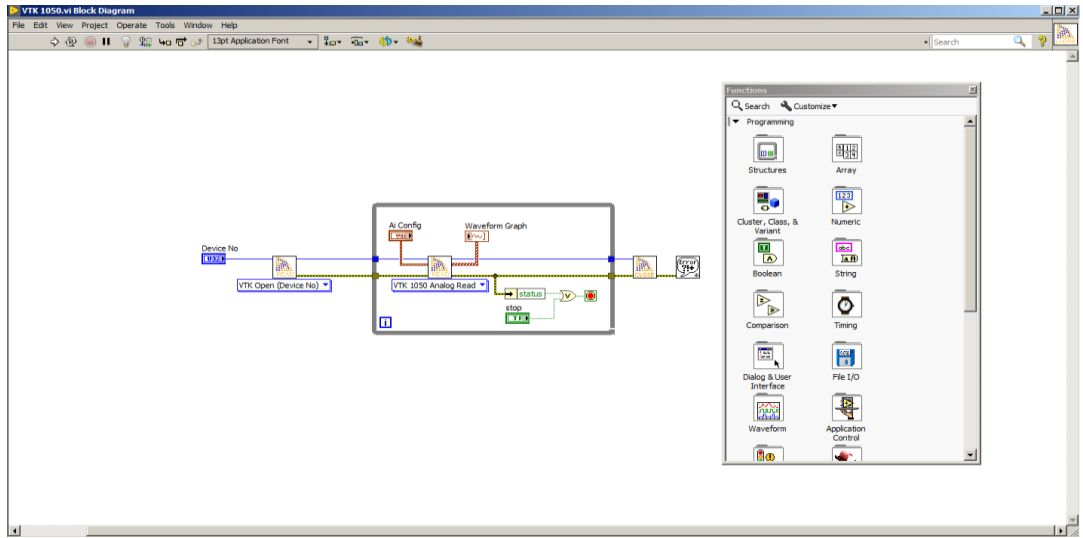
Şekil 3.17 VTK 1050 Veri Toplama Kartı Teknik Çizimleri

### 3.3.7 Labview Veri analiz programı

Labview; bir grafik tabanlı programlama alt yapısı arabirimidir. Ufak grafiksel semboller ve veri yolları ile akış diyagramları hazırlamaya yarayan ve üretilen programları nesnel ara yüze sahip birçok küçük yapıda ki programları birleştirme işlemini gerçekleştirmeye yaramaktadır. Test ve ölçme işlemlerinde doğru analizler ve sonuç grafikleri çıkararak mühendislik ve teknik konularda araştırmacı ve üreticilerin büyük yardımcısı olmuştur. Veri toplama kartları, modül

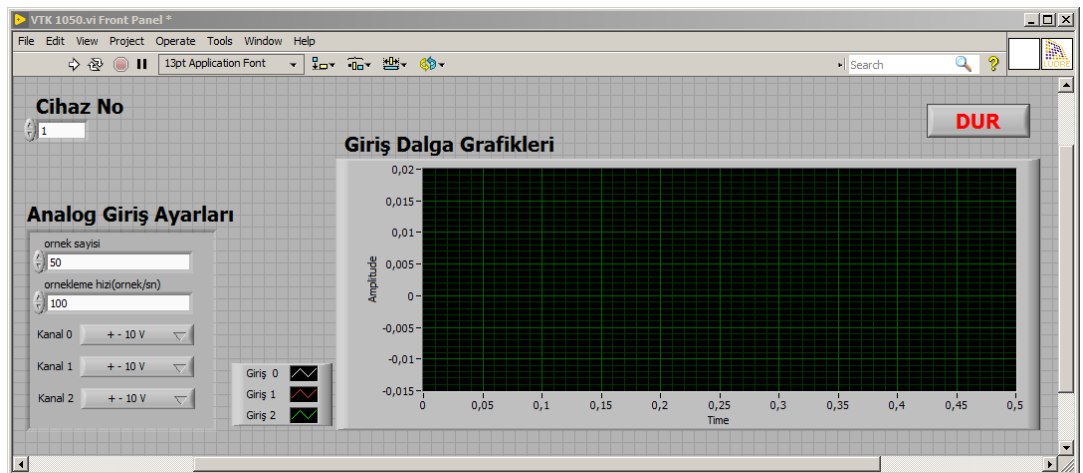


enstrümantasyon cihazları, entegre kartlar ve piyasada sıkça kullanılan kartlar ile senkron bir şekilde çalışabilmektedir. Bizde çalışmamızda kullanacağımızı veri toplama kartı ile uyumlu çalışabilen Labview programı kullanacağız. Şekil 3.18’de ki tasarım ara yüzün de tasarladığımız programcık veri toplama kartından alacak olduğu verileri analiz için kullanacağımız grafiklere dökmüş olacaktır.



Şekil 3.18 LabVIEW Veri Toplama Akış Diyagramı Oluşturma

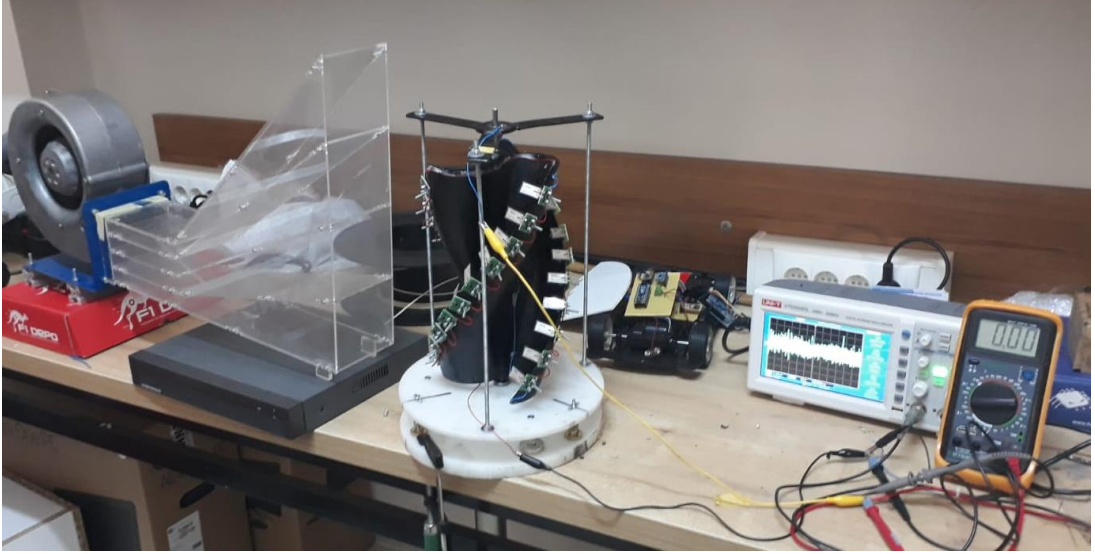
Gerçekleştirilen grafik tasarımı ile veri toplama kartında bulunan 3 kanallı veri gerçek zamanlı alınarak Şekil 3.19’ da ki dalga grafiği şeklinde inceleme fırsatı verecektir. Almış olduğu örnekleme miktarının sıklığı da gerçekleşecek olan ani gerilim düşümlerini bizim için sergileyecektir.



Şekil 3.19 LabVIEW Veri Toplama ve Dalga Analizi Grafiği oluşturma

### 3.3.8 Ölçüm Cihazları

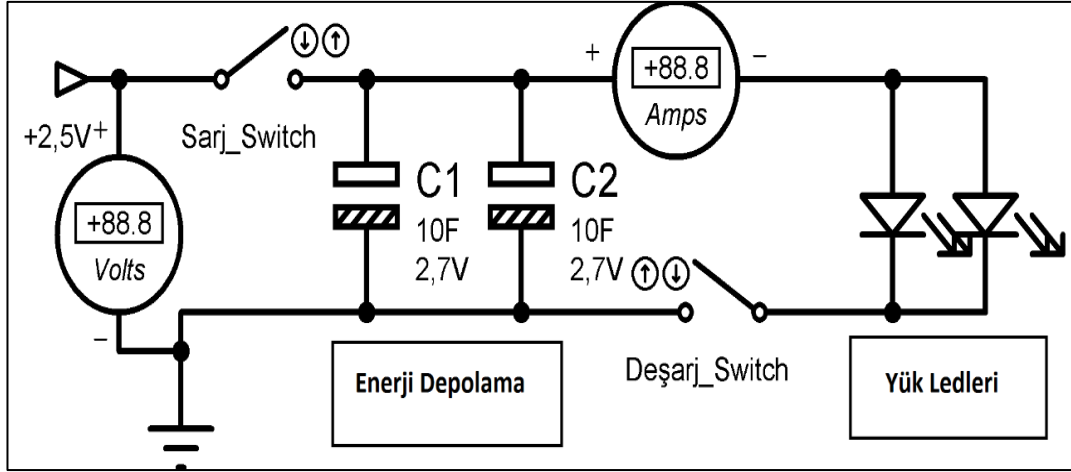
Ölçüm ve test aşamalarından bütün test kademelerinde kullanılma üzere paralel ölçüm alacak şekilde 1 adet osiloskop ve 3 adet multimetre kullanılmıştır. Ölçülmesi hedeflenen akım değeri seviyeleri mikroamper ( $\mu\text{A}$ ) seviyelerinde olduğu için ölçüme en uygun hassasiyete sahip ölçüm cihazları tercih edilmiştir. Kabloleme işlemi ise piezoelektrik titreşim üreteçlerinin verimini olumsuz yönde etki etmeyecek şekilde rüzgâr tünelinin arka planında kabloleme işlemi yapılmıştır. Rüzgâr hızını ( $\text{m/sn}$ ) tespit etmek için kullanılan analog anemometre için ise bir adet multimetre ile çıkışındaki gerilim değerine göre rüzgâr hızının tespiti gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.20’de rüzgâr test esnasında kullanılan ölçüm düzeneği ve yapılan ölçüm işlemleri görülmektedir.



Şekil 3.20 Rüzgâr Testlerinde Kullanılan Deney Düzeneği

### 3.3.9 Enerji Depolama ve Yük Devresi

Test ve deney aşamasından sonra üretilen enerjiyi depolanması ve yük altından denenerek gerçek bir üreteç testi gerçekleştirmek için depolama ve yük kartı tasarlandı. Şekil 3.21’de Şarj ve Deşarj için tasarlanmış olan süper kondansatörlü devre sergilenmiştir.



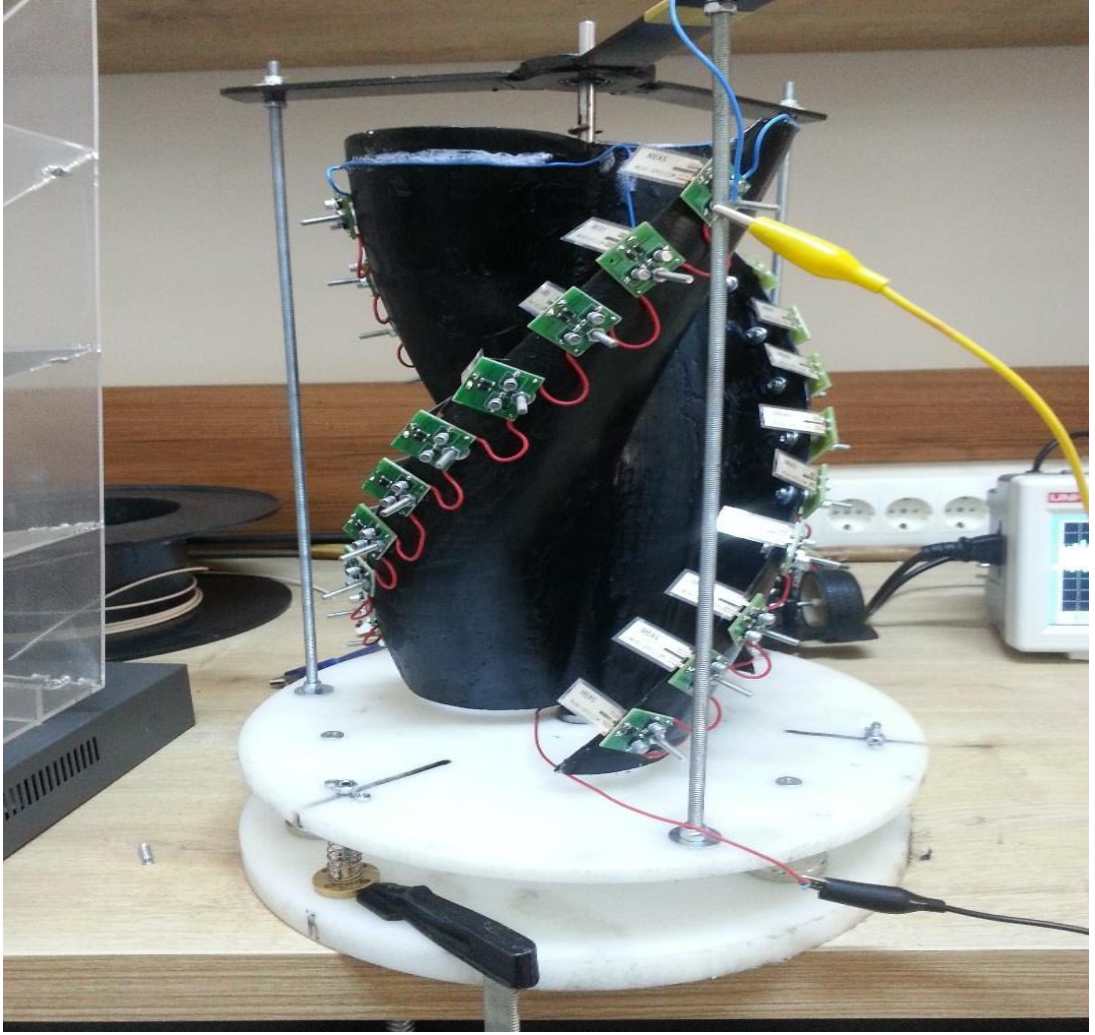
**Şekil 3.21** Süper Kondansatörlü Şarj ve Deşarj devresi

Şekil 3.21’de görülen devrenin tasarımı ve simülasyon işleminin ardından delikli baskı devre plaketi üzerine iki adet paralel 2.7 Volt 10 Farad kapasiteli süper kondansatör ile iki adet paralel bağlı 2 Volt gerilim altından 20 mA akım çeken ledler kullanılmıştır (Xie ve ark., 2013).

## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

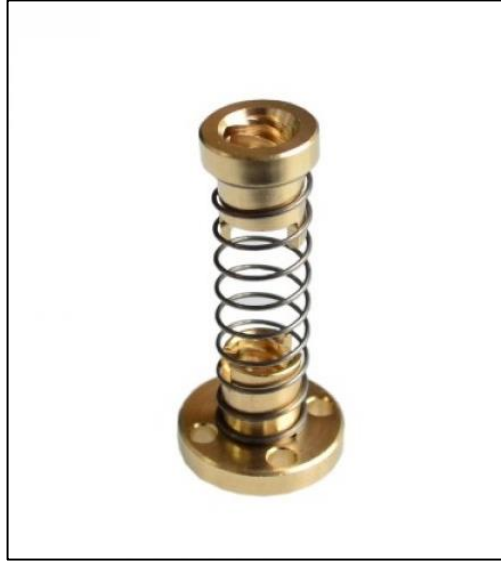
### 4.1 Deney Düzenineinin Oluşturulması

Rüzgâr tüneli ile test işlemlerine başlamadan önce 3 boyutlu yazıcı ile oluşturulan kanat üzerine 30 adet piezoelektrik titreşim ile enerji hasat kartlarını her kanadın üzerine 10 adet düşecek şekilde yerleştirilerek birbirleri ile seri bağlantı oluşturulmuştur. Şekil 4.1’de dikey eksek üzerine yerleştirilmiş helis yapıları kanatlar üzerine yerleştirilmiş piezoelektrik titreşim hasat kartları görülmektedir.



Şekil 4.1 Piezoelektrik Titreşim Hasat Kartlarının Seri Gruplar Halinde Kanatlar Üzerine Yerleşimi

Piezelektrik titreşim hasat kartlarının yerleşim işlemi bittikten sonra tüm mekanizma  $120^0$  derecelik açı ile yerleştirilmiş Şekil 4.2'deki yaylı trapezler üzerine oturtulmuştur (Anonim, 2017b). Kullanılan trapez yaylar sistemin rüzgâr karşısında salınımını kolaylaştırırken, rüzgârın akışının kesildiği anlarda başlangıç durumuna dönmesini sağlayacaktır. Trapez yaylar kullanılarak piezelektrik titreşim üreticinin en verimli çalışma şekli rüzgar basıncı, yay titreşimi ve salınım olayları sağlanmış oldu.



**Şekil 4.2** T8 Yaylı Trapez

Bu yayların yerleşim amacı titreşim miktarını artırarak daha fazla enerji üretimi gerçekleştirileceği hedeflenmiştir. Yaylar üzerine oturtulan sistem rezonans değerini desteklemek amaçlı N-N ve ya S-S kutupları birbirini göreceğ şekilde yine  $120^0$  derecelik açı ile taban ve mekanizma arasına Şekil 4.3'de görülen havşa delikli neodyum mıknatıslar yerleştirilmiştir (Anonim, 2014b). Bu mıknatıslar dünyanın en güçlü mıknatısları arasında yer almaktadır yaylardan doğacak olan salınımın sıklığını artırmak amaçlı birbirini iten bir yapı oluşturularak salınımın devamlılığı korunmuş oldu. Sistem üzerinde bulunan dikey eksen hem alttan hem de üstten yerleştirilen Şekil 4.4'de görülen transmisyon mili üzerinden üretilen enerji kablolar vasıtası ile sistemin dışına aktarılmış oldu.



**Şekil 4.3** Havşa Delikli Neodyum Mıknatıs

Bütün bu işlemlerin ardından 7 kademeli rüzgar kaynaklı deney seti oluşturularak test aşamasına geçildi. Deney düzeneğinde kullanılan rüzgar tünelinin radyan motoru hız kademeleri 7 adet olduğu için yedi farklı rüzgar hızı üzerinden test işlemini gerçekleştirdik.



**Şekil 4.4** Transmisyon Mili

## 4.2 Piezoelektrik Üreteci ile Gerilim Ölçümleri

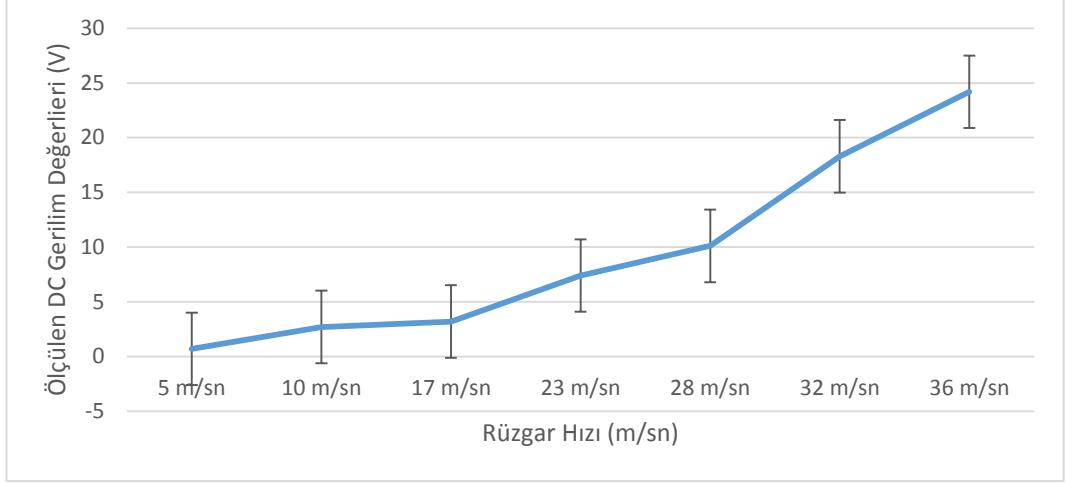
Gerilim ölçümleri deney düzeneği kurulumunun ardından, rüzgâr tüneli ile sabitlenerek düşük rüzgar hızından yüksek rüzgar hızlarına doğru gidilerek test işlemi ve gerilim ölçümleri başlamıştır. Elde edilen veriler kaydedilerek Çizelge 4.1 oluşturulmuştur. Ölçümlerin sağlıklı olması amacı ile 3 adet voltmetre kullanılarak ölçümler gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneği ile rüzgâr tüneli arasına anemometre yerleştirilerek deney düzeneği üzerinde bulunan kanatlara çarpan rüzgâr hızı metre/saniye cinsinde hesaplanmış olduk. Deney esnasında Çizelge 4.1’de görülen gerilim değerlerine ulaşmak için deney düzeneği oluşturulurken kullanılan piezoelektrik Doğru gerilim hasat kartları üzerinde bulunan 22 uf (mikro farad)’lık 60 adet kondansatörün şarj olma sürelerini beklemek durumunda kalmış olduk.

**Çizelge 4.1** Rüzgar Hızlarına Göre Gerilim Değerleri

Hız Kademeleri	Ölçülen Rüzgar Hızı	Ölçülen Gerilim Değeri (DC)	Erişim Süresi
1	5 m/sn	0,70 V	12 sn
2	10 m/sn	2,7 V	20 sn
3	17 m/sn	3,2 V	30 sn
4	23 m/sn	7,4 V	65 sn
5	28 m/sn	10,11 V	90 sn
6	32 m/sn	18,30 V	110 sn
7	36 m/sn	24,2 V	140 sn

O yüzden piezoelektrik titreşim üreteçlerinden sağlıklı gerilim elde etmek için biraz bir sürenin geçmesi gerektiği tespit edildi. Şekil 4.5’de oluşturulan grafikte rüzgar değerlerine göre üretilen maksimum gerilim değerlerine erişilmiş olundu.

Düşük rüzgar hızlarından oluşan rezonans düşük olduğu için erişilen gerilim değerleri oldukça düşük seviyelerde kalmaktadır. Rezonans değerini artırmak için piezoelektrik titreşim üreteçleri üzerine düşen rüzgâr miktarını artırarak yüksek gerilim değerlerine erişile bilindi. Piezoelektrik titreşim yaprakları üzerine giren ve çıkan rüzgar miktarı ne kadar hızlıysa üretilen enerji miktarı da o kadar çok olduğu tespit edildi. Ayrıca bu titreşime ek olarak kullanılan trapez yayları da ve neodyum mıknatıslarda rezonans değerine katkısı büyük olmuştur.



**Şekil 4.5** Ölçülen Maksimum Gerilim Değerleri

### 4.3 Piezoelektrik Üretici ile Akım Ölçümleri

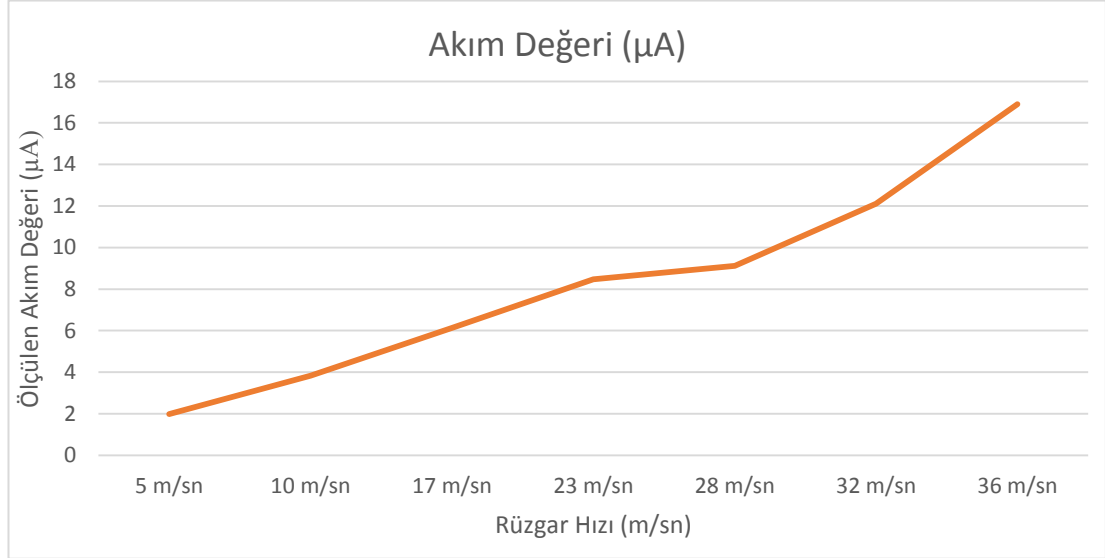
Gerilim ölçüm testlerinin ardından Akım ölçümlerine geçilerek 7 kademeli rüzgar hızına göre akım ölçümleri de gerçekleştirilmiştir. Yapılan ölçümlerde elimizde bulunan ölçü aletlerinin doğruluğuna katkı sağlamak amaçlı osiloskop da kullanılmıştır. Osiloskop 'un tercih edilmesinin sebebi ise piezoelektrik titreşim enerji kaynaklarından elde edilen akımı miktarının mikroamper seviyelerinde olduğu tespit edilmiştir (Türkmen ve Çelik, 2018). Bu sebeple ölçü aletlerinin bu akım seviyelerini yakalayamayabileceği düşünülmüştür. Yapılan testler sonucunda Çizelge 4.2'de elde edilen akım değerleri sergilenmektedir.

**Çizelge 4.2** Rüzgar Hızlarına Göre Ölçülen Maksimum Akım Değerleri

Hız Kademeleri	Ölçülen Rüzgar Hızı	Ölçülen Akım Değeri (DC - $\mu\text{A}$ )
1	5 m/sn	1,985 $\mu\text{A}$
2	10 m/sn	3,841 $\mu\text{A}$
3	17 m/sn	6,124 $\mu\text{A}$
4	23 m/sn	8,475 $\mu\text{A}$
5	28 m/sn	9,125 $\mu\text{A}$
6	32 m/sn	12,114 $\mu\text{A}$
7	36 m/sn	16,892 $\mu\text{A}$

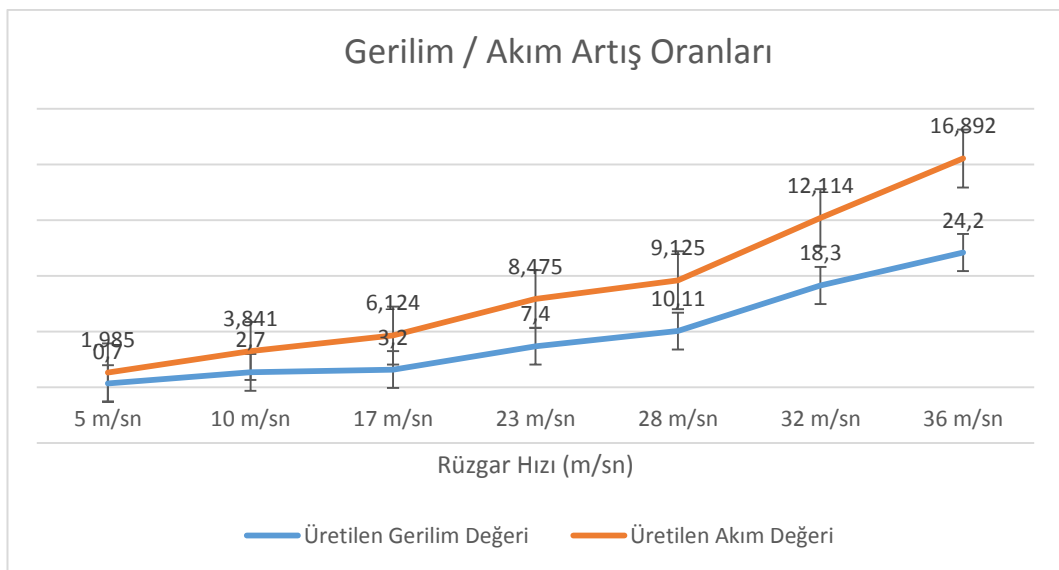


Yapılan testlerde ölçü aletleri ve osiloskop'un ayarları Doğru akım kademesinde ayarlanmıştır. Çünkü seri halde gruplandırılmış 30 adet piezoelektrik titreşim hasat kartlarından doğru akım alınmaktadır.



**Şekil 4.6** Ölçülen Maksimum Akım Değerleri

Tekrarlanan işlemler sonucunda elde edilen akım seviyeleri ihtiyaç duyulan, elle tutulabilir seviyelerin çok çok altında kalmaktadır. Yani bir pili şarj etmek için gerekli en az akım miktarları mili amper seviyesinde iken burada üretilen enerji mikroamper seviyelerinde oldu tespit edildi. Elde edilen veriler ile üretilen gerilim değeri ile akım değeri karşılaştırılmak istenirse, Şekil 4.7'de oluşturulan grafikte üretilen gerilim ile akımın paralellik gösterdiği incelenmiş olur.



**Şekil 4.7** Rüzgâr hızına göre Gerilim Akım Artış Eğrileri

#### 4.4 Piezoelektrik Üretici ile Gerilim Düşürme İşlemi

Yapılan deneyler sonucunda elde edilen enerjinin depolanabilir seviyeye gelmesi gerçek amaca ulaşmada en önemli adım olarak adlandırılabilir. Üretilen gerilim değeri Güç kanunu taban alındığında Eşitlik 3.1’de görüldüğü gibi elimizdeki güç sabit olduğu düşünülürse;

$$\text{Güç(W)} = \text{Akım(I)} \times \text{Gerilim(V)} \quad (4.1)$$

Yani

$$P = I \cdot V$$

O zaman Eşitlik 4.1’e göre sistemde elden edilen gerilim kullanılabilir minimum düzeylere indirildiğinde; elimizde olan akımın yükselmesi söz konusu olacaktır. Bu işlemi gerçekleştirmek için tasarlanmış olan Step Down (Buck converter) devreleri kullanılması öne sürmüştüğümüz teoriyi ispatlamış olacaktır.

24 Volt doğru gerilim değerine, yaklaşık 140 sn de ulaşıp artık sabit bir gerilim olduğunda üretilen akım değeri yaklaşık 17 mikroamper seviyesinde olduğu tespit edildi. Bu sonuçlar neticesinde 24 volt giriş gerilim değerini 2,7 volt gibi bir gerilime düşürürsek, elde edilen akım değeri bizim ihtiyacımız olan seviyelere gelmiş oldu.

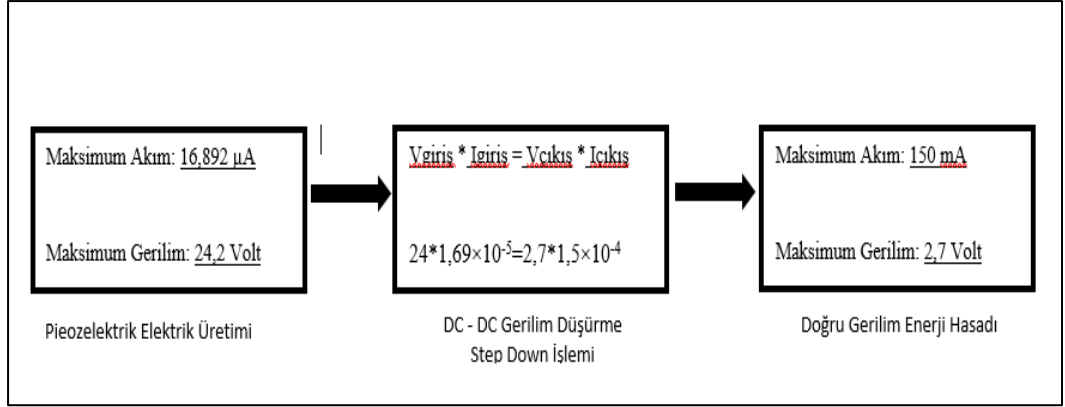
O zaman; Giriş Gerilimi ile giriş akımının çarpımı, Çıkış gerilimi ile çıkış geriliminin çarpımına eşit olacaktır, Sonuç olarak işlem yaptığımızda Eşitlik 4.2 ve 4.3’ü elde etmiş olduk.

$$V_{\text{giriş}} \cdot I_{\text{giriş}} = V_{\text{çıkış}} \cdot I_{\text{çıkış}} \quad (4.2)$$

Yani

$$24 \cdot 1,69 \times 10^{-5} = 2,7 \cdot 1,5 \times 10^{-4} \quad (4.3)$$

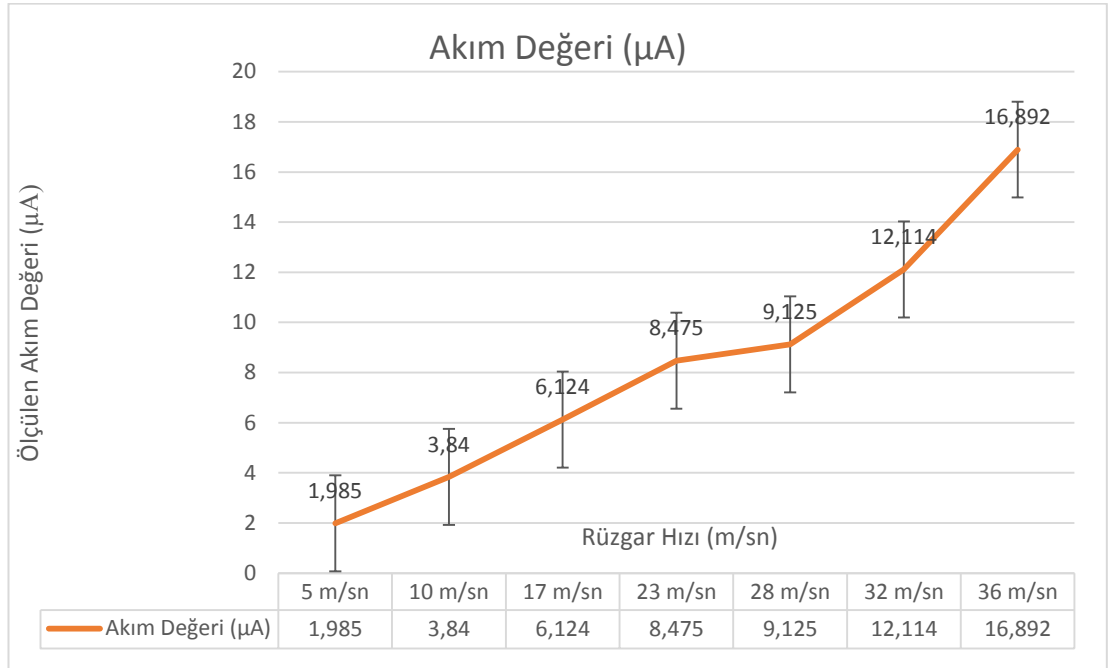
elde edilmiş oldu. Böylece 2,7 Volt, 150 miliamper elde ettik. Bu denklemi diyagram şeklinde inceleyecek olursak Şekil 4.8’deki diyagramı elde etmiş olduk. Bu gerilim ve akım değeri ile pilden ziyade Süper kondansatör şarj etmek için ideal bir akım değeri elde ettik.



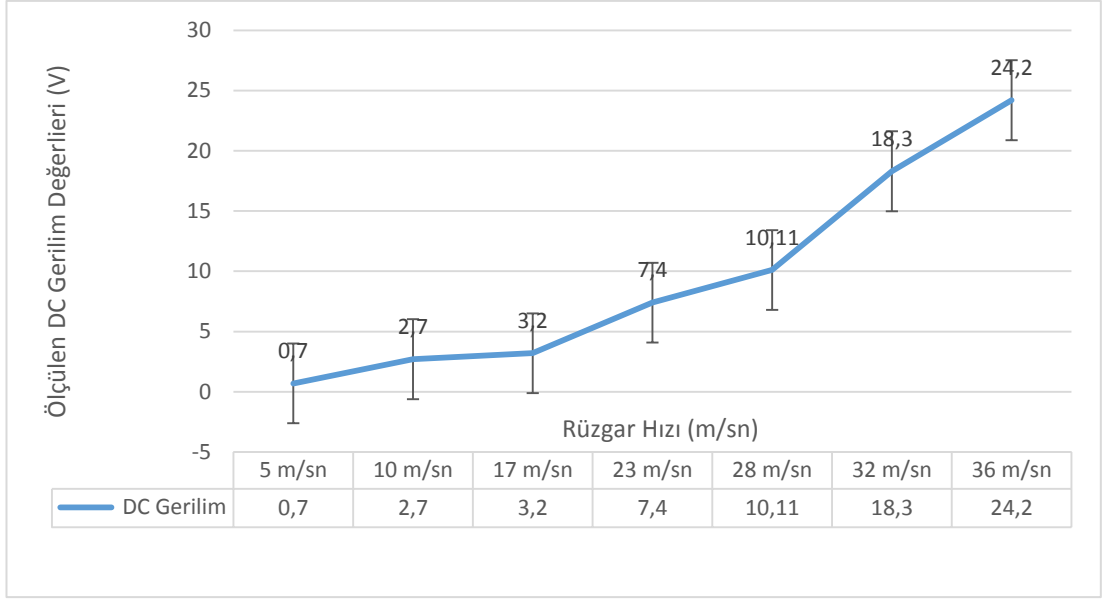
Şekil 4.8 Üretilen Enerji Düşürülme ve Sonuç Akış Diyagramı

#### 4.5 Piezoelektrik Üreteci İle Güç Hesaplama

Piezoelektrik üreteçlerin, ürettikleri akım ve gerilim değerleri tespit edildikten sonra sıra elde edilen gücün hesaplanmasına gelmiştir. Ölçümlerde gerilim ve akım değerlerini elde etmek için hasat kartları üzerinde bulunan kondansatörlerin şarj olmalarını beklemiştik. Bu yüzden güç hesabında da şarj işlemleri tamamlandıktan sonraki elde edilen maksimum gerilim ve akım değerleri kullanılarak güç hesabı yapılmıştır. Buna göre; kullanılacak akım değeri Şekil 4.9’de, gerilim değeri ise Şekil 4.10’ da gösterilmiştir. Çizelge 4.3’ de ise 7 kademeli rüzgar verisine göre akım ve gerilim değerleri sergilenmiştir.



Şekil 4.9 Güç Hesabında Kullanılan Maksimum Akım Değeri



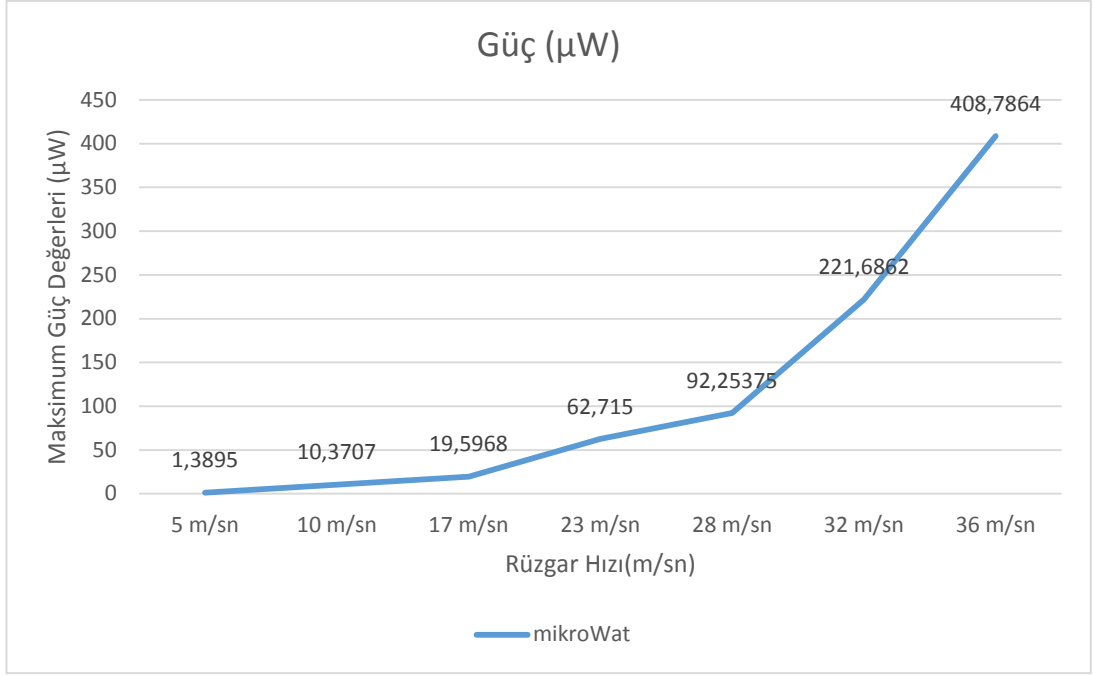
**Şekil 4.10** Güç Hesabında Kullanılan Maksimum Gerilim Değeri

Bu gerilim ve akım değerleri ışığında üretilen güç verisi analizi yapabilmek için **P** (güç) = **V**(gerilim) \* **I**(akım) formülünü kullanılmıştır.

**Çizelge 4.3** Rüzgar Hızlarına Göre Elde Edilen Güç Tablosu

Rüzgar Hızı (m/sn)	Üretilen Gerilim	X	Üretilen Akım	=	Elde Edilen Güç
5 m/sn	0,70 V	x	1,985 µA	=	<b>1,3895 µW</b>
10 m/sn	2,7 V	x	3,841 µA	=	<b>10,3707 µW</b>
17 m/sn	3,2 V	x	6,124 µA	=	<b>19,5968 µW</b>
23 m/sn	7,4 V	x	8,475 µA	=	<b>62,715 µW</b>
28 m/sn	10,11 V	x	9,125 µA	=	<b>92,25375 µW</b>
32 m/sn	18,30 V	x	12,114 µA	=	<b>221,6862 µW</b>
36 m/sn	24,2 V	x	16,892 µA	=	<b>408,7864 µW</b>

Burada rüzgâr hızına göre elde edilen güç verilerini grafiksel olarak Şekil 4.11’da inceleyecek olursak, elde edilen güç de rüzgâr hızı ile doğru orantılı olduğunu tespit etmiş olduk. O halde; elde edilen maksimum güç 36 m/sn (metre/saniye) hızda 408,79 µW seviyesinde olduğu tespit edilmiştir.



**Şekil 4.11** Rüzgâr Hızlarına Göre Elde Edilen Güç

## 5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Yapılan testler ve deneyler sonucunda piezoelektrik titreşim üreteçlerinden elektrik üretimi sonucu elde ettiğimiz maksimum güç 36m/sn rüzgar hızında 408.79  $\mu$ W'dır. Kullanılan piezoelektrik titreşim üreteçlerinin teknik dokümanlarına göre elde edebileceğimiz maksimum gücün 12mW seviyelerinde olması gerektirir. Burada üretilen güçten elde edilen verim 3.4% seviyelerinde kalmıştır. Bu nedenle 1mA seviyelerine çıkması gereken akım değeri 16,90  $\mu$ A seviyelerinde kalmıştır. Test esnasında rezonans değerini yükseltmek amacıyla eklenen trapez yayları ve neodyum mıknatıs ise mevcut verime 12% kadar katkıda bulunmuştur. Diğer çalışmalar ile verim bazında karşılaştırma yapıldığında 2.2% ve 2.5% seviyelerinde olduğu gözlemlenmiştir (Demir, 2017; Büyükkeskin, 2018). Kullanılan rüzgar tüneline bulunan rüzgar hızı ile kademeleri piezoelektrik üreteçleri üzerine yapmış basınç değişimleri yaşanan rezonans değerinde büyük değişikliklere sebep olmuştur. Yapılan kablolama ve kablo mesafelerinden doğacak olan akım düşümlerini engellemek amaçlı yapılan kısaltma ve iç direnci farklı olan kablolar denenmesine rağmen elde edilen akım değerinde bir değişiklik gözlenmemiştir. Ancak deney düzeneğinde kullanılan yük devresinde kullanılan süper kondansatörler şarj ve deşarj esnasından yaşanan gerilim düşümleri step down DC-DC gerilim düşürücü devresinde yapılan şarj öncesinde 15-20 saniye kadar beklemenin ardından yaşanmadığı tespit edilmiştir. Gerilim düşürme işlemleri gerçekleştirildikten sonra ölçülen akım değerlerinden de görüldüğü gibi mA seviyelerinde akım üretiminin gerçekleşeceği gözlemlenmiştir. Üretilen gerilimin depolanması ve ardından iki adet paralel kırmızı led ile yükte kullanılması elde edilen enerjini kullanılabilir düzeyde olduğunu tespit ettik. Şarj esnasından toplam kapasiteye erişme süresi 2-2.5 dakika iken iki led ile deşarj işlemi 10-12 dakika gibi sürelerde tamamlamıştır. Bu durum gösteriyor ki; elde edilen akım değeri, iki paralel ledin çektiği akım değerinden çok daha fazladır. Elle tutulur verilere ulaşmış durumdayız fakat teknik dokümanlarda verilen değerlere ulaşmak için profesyonel seviyede hazırlanmış türbülanslı rüzgar türbinlerine ihtiyaç vardır. Ancak teknik imkânsızlıklardan dolayı maalesef ölçümler bu şekilde gerçekleştirilmiştir.

Edinilen bilgiler ve deneyimin ışığında önerilerden bahsedecek olursak; Piezoelektrik kristallerinin ile bilindiği üzere ve bu çalışmada da incelendiği gibi birçok kullanım alanları mevcuttur. Bu kadar çok alanda kullanılmasına rağmen enerji üretimi amacıyla kullanılması yeni ve geliştirilmeye açık bir alandır. Piezoelektrik ile ilgili bilimsel araştırmalar ve çalışmalar halen devam etmektedir (Yazıcı ve ark., 2004; Ertürk ve İnman, 2011; Akkaya Oy ve Özdemir, 2018). Her geçen gün artan enerji ihtiyacına rağmen, bu ihtiyaca cevap verebilecek daha çevreci ve kendini yenileyebilen sistem tasarımları cevap verebilecek duruma gelecektir. Öte yandan yenilenebilir enerji kaynaklarından olan rüzgar enerjisinden elektrik üretim metotlarında değişikliklere sebep olacaktır. Çünkü her ne kadar karlı sistemlerde olsa büyük çaplı rüzgar enerji santralleri ciddi yatırımlara ihtiyaç duymaktadır. Ülkemizde de rüzgar enerji kaynağı oldukça fazla olsa da kurulum maliyetleri yüzünden enerji şirketleri böyle yatırımlara girişmemektedir (Doğanay ve Coşkun, 2017). Piezoelektrik temelli enerji üretimleri geliştirildiğinde kurulum maliyetleri düşecek daha az yer kaplayan tasarımlar üretilebileceği öngörülmektedir.

Rüzgar temelli generatör tasarımları, diğer rüzgar enerji santrallerine nazaran daha kompakt ve düşük rüzgar hızlarına ihtiyaç duyduğu için kullanım alanı çok büyük olacağı ön görülmektedir. Şuana kadarki uygulama çalışmaları incelendiğinde otoyollara, caddelere ve evlerin bahçelerinden düşük türbülans yaratan rüzgarlı bölgelerde kullanılmaktadır. Bakım maliyeti ise diğer santrallerin aksine iç piyasadan temin edilebilecek yedek parçalar ile daha çekici hale gelmektedir. Böyle bir uygulama çalışması ile yolların, evlerin ışıklandırılması veya caddelerde bulunan sinyalizasyon sisteminin enerji kaynağı otonom olan bir sistem mümkündür. Önemli bir avantajı ise küçük çaplı uygulamalar ve dik kanat yapısı ile çok küçük bir türbülans alanı ile hem görüntü hem de kompakt tasarımlar ile çevreyi rahatsız etmeyen bir yapıdadır. Birde dikey eksen olması ile birlikte türbülans değerini artırmak amaçlı eksen boyunu uzatarak verimi artırabiliriz. Herhangi bir elektrik ve ya sinyalizasyon direği üzerine monte edilerek ekstra bir yere ihtiyaç duymaksızın enerji üretimini desteklemektedir.

Çalışmamız sırasında tasarlanmış olan Piezoelektrik enerji hasat kartı ile doğrudan depo edilebilir enerji elde edilmesi, ekstradan AC-DC dönüşümüne gerek kalmaksızın üretimi mümkün kılmıştır. Böylece üretilen enerji doğru bir enerji depolama algoritması ile verimli bir enerji yönetimi gerçekleştirilecektir. Titreşim temelli olan bu çalışma rüzgar ile birlikte kullanılan yay ve mıknatıslar ile birlikte diğer mekanik enerji kaynakları ile hibrit bir üretimin gerçekleştirileceğini bize sergilemiştir.

Sonuç olarak Piezoelektrik malzemeler ile gerek basınç temelli gerekse titreşim temelli çalışabilecek bilim insanları ve enerji üretimi ile ilgilenenler için gelecek vadeden bir malzemedir. Bu çalışmadaki asıl amaç Piezoelektrik titreşim temelli enerji üretim metotları geliştirmek malzeme üzerinde ki üretim verimini artırmaktır. Böyle çalışma ve uygulamaları arttırarak Piezoelektrik malzemeler üzerine ilgiyi çekerek gelişiminin hızlanması gerçekleşmiş olacaktır. Gerçekleştirmiş olduğumuz çalışmada bundan sonraki yapılacak olan uygulamalar ve çalışmalara bir katkı sağlayabildiysek çalışmamız tam manası ile amacına ulaşmış demektir.



## 6. KAYNAKLAR

- Acciari, G., Caruso, M., Miceli, R., Riggi, L., Romano, P., Schettino, G., & Viola, F. (2017). Piezoelectric rainfall energy harvester performance by an advanced Arduino-based measuring system. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 54(1), 458-468.
- Akkaya Oy, S., & Özdemir, A. E. (2018). Piezoelectric-Based Low-Power Wind Generator Design and Testing. *Arabian Journal for Science & Engineering*, 43(6), 2759-2767.
- Al-Ashtari, W., Hunstig, M., Hemsel, T., & Sextro, W. (2013). Enhanced energy harvesting using multiple piezoelectric elements: theory and experiments. *Sensors & Actuators A: Physical*, 200, 138-146.
- Aldoss, T. K., & Najjar, Y. S. (1985). Further development of the swinging-blade Savonius rotor. *Wind Engineering*, 9(3), 165-170.
- Ali, W.G. & Nagib, G. (2012). Design considerations for piezoelectric energy harvesting systems. In *Proceedings of the 2012 International Conference on Engineering and Technology (ICET)*, 10-11 Ekim, Kahire, Mısır.
- Anonim, (1999). Measurement Specialties, Inc. Piezofilm sensors technical manual. <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Flex/MSI-techman.pdf> (Erişim Tarihi: 17.06.2019).
- Anonim, (2008). LDT0 Solid State Switch/Vibration Sensor .<https://cdn.solarbotics.com/products/datasheets/ldtosensor.pdf> (Erişim Tarihi:10.04.2019)
- Anonim, (2009). New Electric Material for Sensors. <http://www.emfit.com/> (Erişim Tarihi: 17.06.2019).
- Anonim, (2010a). Information of The Company B-Band, Finland. <http://www.b-band.com> (Erişim Tarihi: 17.06.2019).
- Anonim, (2010b). Aluminium Electrolytic Capacitors. <https://www.mouser.com.tr/datasheet/2/445/865080340003-1075192.pdf> (Erişim Tarihi: 05.04.2019)

- Anonim (2012). Rapid 1 and Rapid 2 Si Power Diodes. [https://www.infineon.com/cms/en/product/transistor-diode/diode/?ef\\_id=Cj0KCQjwoInnBRDDARIsANBVyAQSkSm5LpwWsxoP-\\_YolZEZJfVSDcLWDqRsp5jpbykq-wawUd0vLH4aAvfQEALw\\_wcB:G:s&s\\_kwid=AL!719!3!3\\_18399575960!p!!g!!schottky%20diode](https://www.infineon.com/cms/en/product/transistor-diode/diode/?ef_id=Cj0KCQjwoInnBRDDARIsANBVyAQSkSm5LpwWsxoP-_YolZEZJfVSDcLWDqRsp5jpbykq-wawUd0vLH4aAvfQEALw_wcB:G:s&s_kwid=AL!719!3!3_18399575960!p!!g!!schottky%20diode) (Erişim Tarihi: 05.04.2019)
- Anonim (2014a). AC Motor Hız Kontrol Devresi (Dimmer). [https://www.direnc.net/220v-2000w-motor-hiz-kontrol-karti?lang=tr&h=a2604e4c&gclid=EAIAIQobChMItu3m57qz4gIVx\\_hRCh39AgRvEAQYASABEgJ2PPD\\_BwE](https://www.direnc.net/220v-2000w-motor-hiz-kontrol-karti?lang=tr&h=a2604e4c&gclid=EAIAIQobChMItu3m57qz4gIVx_hRCh39AgRvEAQYASABEgJ2PPD_BwE) (Erişim Tarihi: 05.05.2019)
- Anonim (2014b). Havşa Delikli Neodyum Mıknatıs. <https://www.dunyamagnet.com/cap-25mm-x-delik-cap-10-55-x-kalinlik-5mm-havsali-miknatis-pmu38> (Erişim Tarihi: 05.05.2019)
- Anonim (2014c). Piezo Vibration Sensor. <https://www.sparkfun.com/products/9196> (Erişim Tarihi: 01.04.2019)
- Anonim (2015). Piezoelectric Mini sense 100 Flex Sensor. [https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Flex/MiniSense\\_100.pdf](https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Flex/MiniSense_100.pdf) (Erişim Tarihi: 15.04.2019)
- Anonim (2016). Using of PZT at displays. <http://www.screentec.com> (Erişim Tarihi: 17.06.2019).
- Anonim (2017a). Pleksi glass Tabaka. <https://urun.gittigidiyor.com/yapi-market-tamirat/2mm-21cmx30cm-seffaf-pleksiglas-a4-ebat-seffaf-mika-pleksi-400361514> (Erişim Tarihi: 05.05.2019)
- Anonim (2017b). T8 Yaylı Trapez Somun. <https://www.robolinkmarket.com/t8-yayli-trapez-somun-174983503.html> (Erişim Tarihi: 05.05.2019)
- Anonim (2017c). Morgan Technical Ceramic. Piezoelectric Ceramics Properties and Applications. <http://www.morgantechnicalceramics.com/en-gb/products/piezo-ceramic-components/piezoelectric-ceramics-properties-and-application> (Erişim Tarihi: 17.06.2019)
- APC International Ltd. Product Manual, 2006, Piezoelectric Ceramic: Principles and Applications, Pennsylvania, USA, <http://www.americampiezo.com> (Erişim Tarihi: 04.05.2019)

- Arnold, D. P. (2007). Review of microscale magnetic power generation. *IEEE Transactions on Magnetics*, 43(11), 3940-3951.
- Ballato, A. (1996). Piezoelectricity: History and new thrusts. *IEEE Ultrasonics Symposium. Proceedings*. 3-6 Kasım, San Antoino, ABD.
- Bottom, V. E. (1981). A history of the quartz crystal industry in the USA. *Thirty Fifth Annual Frequency Control Symposium*. 27-29 Mayıs, Philadelphia, Pennsylvania, ABD.
- Büyükkeskin, Ö. (2018). Piezoelektrik Malzemeler Yardımıyla Rüzgâr Enerjisinden Elektrik Üretimi (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Chunsheng, Z. (2011). Ultrasonic motors: technologies and applications, *Springer-Verlag*, New York, ABD.
- Cook-Chennault, K. A., Thambi, N., & Sastry, A. M. (2008). Powering MEMS portable devices—a review of non-regenerative and regenerative power supply systems with special emphasis on piezoelectric energy harvesting systems. *Smart materials and structures*, 17(4), 1-33.
- Demir, F. (2017). Piezoelektrik malzeme ile rüzgardan enerji hasatı. Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Anabilim Dalı, Zonguldak.
- Demirel, H. (2014). Elektronik II. Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Doğanay, H., & Coşkun, O. (2017). Enerji Kaynakları. Pegem Akademi Yayınları. Vadi Grup Ciltevi A.Ş., Ankara, 315s.
- Elvin, N., Elvin, A., & Choi, D. H. (2003). A self-powered damage detection sensor. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 38(2), 115-124.
- Ergun, C., Yılmaz, G., Özdemir, E., Gül, Ö., & Kalenderli, Ö., 2006, Piezoelektrik Malzemeler & Uygulama Alanları, Denizli Uluslar arası Malzeme Konferansı, Pamukkale, Türkiye.

- Erturk, A. (2009). Electromechanical modeling of piezoelectric energy harvesters. (Doktora tezi, Virginia Tech. University, Virginia). Erişim adresi: <http://vtechworks.lib.vt.edu/handle/10919/29927> (Erişim Tarihi: 04.05.2019).
- Erturk, A., & Inman, D. J. (2011). Piezoelectric energy harvesting. John Wiley & Sons.
- Garcia, S., Sampson, K. & Kunitz, E. (1998). Piezoelectric effect and its applications.
- Glynne-Jones, P., Tudor, M. J., Beeby, S. P., & White, N. M. (2004). An electromagnetic, vibration-powered generator for intelligent sensor systems. *Sensors and Actuators A: Physical*, 110(1-3), 344-349.
- Gu, Y., Clark, R. L., Fuller, C. R., & Zander, A. C. (1994). Experiments on active control of plate vibration using piezoelectric actuators and polyvinylidene fluoride (PVDF) modal sensors. *Journal of vibration and acoustics*, 116(3), 303-308.
- Hasler, E., & Stein, E., (1984). "Implantable physiological power supply with PVDF Film," *Ferroelectrics*, 60, 277-282
- Heikkinen L. M., Panula H. E., Lyyra T., Olkkonen H., Kiviranta, I., Nevalainen, T. & Helminen H. J. (1996). Electromechanical film sensor device for dynamic force recordings from canine limbs. *Scandinavian Journal of Laboratory Animal Science*, 24(2), 85–92.
- Hillenbrand, J., & Sessler, G. M. (2004). High-sensitivity piezoelectric microphones based on stacked cellular polymer films (L). *The Journal of the Acoustical Society of America*, 116(6), 3267-3270.
- Hofmann, H., Ottman, G. K., & Lesieutre, G. A. (2002). Optimized piezoelectric energy circuit using step-down converter in discontinuous conduction mode. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 18(2), 696-703.
- Jeon, Y. B., Sood, R., Jeong, J. H., & Kim, S. G. (2005). MEMS power generator with transverse mode thin film PZT. *Sensors and Actuators A: Physical*, 122(1), 16-22.

- Ju, S., & Ji, C. H. (2018). Impact-based piezoelectric vibration energy harvester. *Applied Energy*, 214, 139-151.
- Kılıç, R., & Aslan, V. (2017). Yenilenebilir & Yenilenemeyen Enerjinin İktisadi Büyüme Üzerindeki Etkisi: 28 OECD Ülkesi Üzerine Ampirik Bir Çalışma. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 12(1), 1-12.
- Korkmaz, Z. (2015). *MEMS teknikleri kullanarak esnek piezoelektrik dokunsal algılayıcı dizini üretimi* (Yayımlanmamış Doktora Tezi). Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Köse, F., & Özgören, M. (2005). Rüzgar enerjisi potansiyeli ölçümü & rüzgar türbini seçimi. *Mühendis ve Makine*, 551, 20-30.
- Ledouks, A. (2011). *Theory of piezoelectric materials and their applicaitons in civil engineering* (Yüksek Lisans tezi, Massachussets Institue of Tecnology, Cambridge). Erişim adresi: <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/66839> (Erişim Tarihi: 20.05.2019)
- Lekkala J. (1997). The sound of silence and other applications of the electromechanical film technology, *Industrial Horizons*, 12, 12– 13.
- Lekkala J. & Paaajanen M. (1999). EMFi new electret material for sensors and actuators. *10th International symposium on Electrets, Dephi*, 743– 746.
- Mitcheson, P. D., Miao, P., Stark, B. H., Yeatman, E. M., Holmes, A. S., & Green, T. C. (2004). MEMS electrostatic micropower generator for low frequency operation. *Sensors and Actuators A: Physical*, 115(2-3), 523-529.
- Modi, V. J., & Fernando, M. S. U. K. (1989). On the performance of the Savonius wind turbine. *Journal of solar energy engineering*, 111(1), 71-81.
- Moheimani, S. R., & Fleming, A. J. (2006). *Piezoelectric transducers for vibration control and damping*. Springer-Verlag, Londra, İngiltere.
- Newman, B. G. (1974). Measurements on Savonius Rotor with Variable Gap. *Proceedings of the University of Sherbrook Conference on Wind Energy, Sherbrooke, Quebec, Kanada*.

- Nurbay, N., & Çınar, A. (2005). Rüzgar türbinlerinin çeşitleri & birbirleriyle karşılaştırılması. *III. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu*, 19-21 Ekim, Mersin.
- Ortiz, J., Zabala, N., Monje, P. M., Cokonaj, V., & Aranguren, G. (2013). Energy generation based on piezoelectric transducers. *Energy*, 1(11), 245-250.
- Paaanen, M., Lekkala, J., & Valimaki, H. (2001). Electromechanical modeling and properties of the electret film EMFI. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 8(4), 629-636.
- Patel, I., & Uzun, M. (2011). The Requirement for Piezoelectric Smart Material For Current and Future Applications. *Sigma*, 29, 395-411.
- Potuk, K. B. (2015). *Rüzgar türbini kanat tasarımı & analizi* (Yayımlanmamış bitirme projesi). Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, İzmir.
- Quin-Hua, Q. (2013). *Advances in materials and mechanics*. Springer, Berlin, Germany.
- Raisanen, L., Pohianvirta, R., Unkila, M., & Tuomisto, J. (1992). A new method for the measurement of spontaneous motor activity of laboratory animals. *Pharmacology & toxicology*, 70(3), 230-231.
- Reupke, P., & Probert, S. D. (1991). Slatted-blade Savonius wind-rotors. *Applied Energy*, 40(1), 65-75.
- Roundy, S., Wright, P. K., & Rabaey, J. (2003). A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes. *Computer communications*, 26(11), 1131-1144.
- Shan, X., Song, R., Liu, B., & Xie, T. (2015). Novel energy harvesting: A macro fiber composite piezoelectric energy harvester in the water vortex. *Ceramics International*, 41, 763-767.
- Siivola, J., Leinonen, K., & Räsänen, L. (1993). ETMF-polymer transducer as a detector of respiration in humans. *Medical and Biological Engineering and Computing*, 31(6), 634-635.

- Sodano, H. A., Park, G., & Inman, D. J. (2004). Estimation of electric charge output for piezoelectric energy harvesting. *Strain*, 40(2), 49-58.
- Song, R., Shan, X., Lv, F., & Xie, T. (2015). A study of vortex-induced energy harvesting from water using PZT piezoelectric cantilever with cylindrical extension. *Ceramics International*, 41, 768-773.
- Tani, J., Takagi, T., & Qiu, J. (1998). Intelligent material systems: application of functional materials. *Applied Mechanics Reviews*, 51(8), 505-521.
- Taya, M. (2005). Electronic composites: modeling, characterization, processing, and MEMS applications. *Cambridge University Press*, Cambridge, ABD.
- Topolov, V. Y., Bisegna, P., & Bowen, C. R. (2014). Piezoactive composites: Orientation Effect an Anistropy Factors. *Springer-Verlag*, Berlin, Almanya.
- Türkmen, A. C., & Celik, C. (2018). Energy harvesting with the piezoelectric material integrated shoe. *Energy*, 150, 556-564.
- Türker, Ö. (2009). Pzt/polimer esaslı aktif titreşim kontrolüne uygun akıllı giriş tasarımı ve imalatı. (Yayımlanmamış Doktora Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Ushiyama, I., & Nagai, H. (1988). Optimum design configurations and performance of Savonius rotors. *Wind Engineering*, 12(1), 59-75.
- Williams, C. B., & Yates, R. B. (1996). Analysis of a micro-electric generator for microsystems. *sensors and actuators A: Physical*, 52(1-3), 8-11.
- Xie, X. D., Wu, N., Yuen, K. V., & Wang, Q. (2013). Energy harvesting from high-rise buildings by a piezoelectric coupled cantilever with a proof mass. *International Journal of Engineering Science*, 72, 98-106.
- Yazıcı, E.Y., Alp, İ., Kaygusuz, A., Kolaylı, H., & Vicil, M. (2003). "Piezoelectric technology and study of evaluation of East Karadeniz region quartz deposits. *Industrial Minerals and Building Stones (IMBS)*. 15-18 Eylül, İstanbul, Türkiye.

Yazıcı, E.Y., Alp, İ., Yılmaz, A.O., Celep, O., & Vieil, M. (2004). Piezoelektrik teknoloji ve piezo-malzeme olarak turmalin. 5. *Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*. 13-14 Mayıs, İzmir, Türkiye.



## ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Okan Gökhan USTA
Doğum Yeri	ORDU
Doğum Tarihi	11.11.1987
Uyruğu	<input checked="" type="checkbox"/> T.C. <input type="checkbox"/> Diğer:
Telefon	0 536 887 33 82
E-Posta Adresi	okang.usta@gmail.com
Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi
Fakülte	Teknik Eğitim Fakültesi
Bölümü	Elektronik ve Bilgisayar Öğretmenliği
Mezuniyet Yılı	19.06.2012

