

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

RÜZGAR TAHRİKLİ PİEZOELEKTRİK JENERATÖRLER
KULLANARAK ENERJİ HASADI

TAMARAH AYAD KAREEM

KOCAELİ 2022

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

RÜZGAR TAHRİKLİ PİEZOELEKTRİK JENERATÖRLER
KULLANARAK ENERJİ HASADI

TAMARAH AYAD KAREEM

Doç. Dr. Mehmet Zeki BİLGİN

Danışman, Kocaeli Üniv.

.....

Dr. Öğr. Tarık ERFİDAN

Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

.....

Prof. Dr. Mehmet Bayrak

Jüri Üyesi, Sakarya Üniv.

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 23.06.2022

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ

Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez/proje çalışmada,

- Bu tezin/projenin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu,
- Çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı,
- Bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi,
- Bu çalışmanın Kocaeli Üniversitesi'nin abone olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun olduğunu,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Tezin/Projenin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez/proje çalışması olarak sunmadığımı,

beyan ederim.

☒ Bu tez/proje çalışmasının herhangi bir aşaması hiçbir kurum/kuruluş tarafından maddi/alt yapı desteği ile desteklenmemiştir.

☐ Bu tez/proje çalışması kapsamında üretilen veri ve bilgiler tarafından no'lu proje kapsamında maddi/alt yapı desteği alınarak gerçekleştirilmiştir.

Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

.....
Tamarah KAREEM

YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/projemin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullarla kullanıma açma izninin Kocaeli Üniversitesi'ne verdiğimi beyan ederim. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin/projemin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanımı bana ait olacaktır.

Tezin/projenin kendi özgün çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin/projenin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim kurulu tarafından yayınlanan **“Lisanüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge”** kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi/ Kocaeli Üniversitesi Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- ☐ Enstitü yönetim kurulu kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.
- ☐ Enstitü yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.
- ☒ Tezim/projem ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

.....

Tamarah KAREEM

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Saygı ve Teşekkürlerimle,

Özel teşekkür, piezoelektrik malzemelerin verimli bir proje olabileceğini ilk öneren Doç. Dr. Mehmet Zeki BİLGİN'e, danışmanım ve akıl hocam bu projeye sonuna kadar öncülük ettiği için herkesten daha fazla övgüyü hak ediyor. Teşekkür ederim. Bu projenin başlangıcında birçok sorumu cömertçe yanıtladı ve piezoelektrik malzemelerle uğraşmanın değerli bir çaba olduğuna beni ikna etti. Sağlık ve esenlik dilerim.

Hayatımın her anında olduğu gibi tez dönemim boyunca da her zaman yanımda olan, bana moral ve motivasyon veren, beni sonsuz destekleyen annem Sahar HAŞİM'e, beni hayatta başarılı görmek hayali olan, bana ders çalışmayı öğreten, ömrü boyunca vefat edene kadar bana destek olan ve bana her şeyi veren babam Ayad KAREEM'e. Çalışmalarımın her aşamasında beni, tıpkı hayata olan inancımı arttırdığı gibi destekleyen, her sıkıntıda yanımda olan, her an yanımda olup desteğini esirgemeyen, varlığıyla bana güç veren, hayatı paylaştığım çok değerli, biricik hayat arkadaşım ve sevgili eşim Mohammed AL-ABBASI'ye, çalışmalarım esnasından ona ayırmam gereken zamandan çaldığım, hayat ve mutluluk kaynağım olan bir tanecik canım kızım Ritaj AL-ABBASI'ye tüm kalbimle teşekkür ederim. Ayrıca hep yanımda olan ve bana destekleyen dayılarıma, son olarak ta bana destek olan ve yanımda olan tüm arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunmak isterim.

Haziran - 2022

Tamarah KAREEM

İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ.....	i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
TABLolar DİZİNİ.....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	x
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Motivasyon	2
1.2. Tezin Amacı.....	2
1.3. Bölümler	3
2. PİEZOELEKTRİK MALZEMELER.....	4
2.1. Piezoelektrik Malzemelerin Tarihçesi	4
2.2. Mekanik Titreşimlerden Enerji Hasadı	5
2.3. Enerji Üretimi ve Piezoelektrik Etkisi	6
2.4. Curie Sıcaklığı	8
2.5. Piezoelektrik Malzemeler	8
2.5.1. Piezoelektrik Kristaller.....	10
2.5.2. Piezoelektrik Seramikler	11
2.5.3. Piezoelektrik Polimerler	12
2.5.4. Piezoelektrik Kompozitler.....	12
2.6. Piezoelektrik Malzemelerin Uygulamaları	12
2.7. Piezoelektrik Malzemeleri Etkileyen Faktörler	15
2.7.1. Yaşlanma Süreci.....	15
2.7.2. Mekanik Etki	15
2.7.3. Elektriksel Etki	15
2.7.4. Termal Etki.....	16
2.8. Piezoelektrik Malzemelerin Matematiği	16
2.9. Piezoelektrik Malzemelerin Elektrik Modeli	20
3. TÜRBİNLER.....	22
3.1. Rüzgar Enerjisi.....	22
3.2. Rüzgar Türbinleri.....	22
3.2.1. Yatay Rüzgar Türbinleri.....	22
3.2.1.1. Ön Rüzgar Türbinleri.....	23
3.2.1.2. Arka Rüzgar Türbinleri	23
3.2.1.3. Tek Kanatlı Türbinler	24
3.2.1.4. İki Kanatlı Rüzgar Türbinleri	24
3.2.1.5. Üç Kanatlı Rüzgar Türbinleri	25
3.2.1.6. Çok Kanatlı Türbinleri.....	25
3.2.2. Dikey Rüzgar Türbinleri	26
3.2.2.1. Savonious Rüzgar Türbinleri.....	26
3.2.2.2. Darrieus Rüzgar Türbinleri.....	28
3.2.2.3. H-Darrieus Rüzgar Enerji Türbinleri.....	28
3.2.3. Eğik Rüzgar Türbinleri.....	29

3.3. Rüzgar Türbini Modelleri Karşılaştırılması	29
3.4. Rüzgar Enerjisi Matematiği	31
3.5. Önceki Çalışmalar	31
4. GÜÇ DÖNÜŞTÜRÜCÜ VE ENERJİ DEPOLANMASI	34
4.1. Giriş	34
4.2. Diyot Köprü Doğrultucu	34
4.3. Filtre Devresi	36
4.4. DC-DC Dönüştürücü	36
4.4.1. Düşüren Dönüştürücü	36
4.4.2. Yükselten Dönüştürücü	37
4.4.3. Düşüren - Yükselten Dönüştürücü	39
4.5. Batarya	40
5. MATERYAL VE YÖNTEM	42
5.1. Giriş	42
5.2. Önerilen Piezoelektrik Enerji Hasatçısının Yapısı	42
5.3. Savonious Rüzgar Türbinler Tasarımı	43
5.4. Manyetik Tasarımı	44
5.5. Elektronik Devre Tasarımı	46
6. DENEYSEL SONUÇLAR	47
6.1. Mod 1	47
6.1.1. Piezoelektrik Çıkış Gerilimi ($V \times 10$)	47
6.1.2. Doğrultucu Çıkış Gerilimi ($V \times 10$)	48
6.1.3. Kondansatör Çıkış Gerilimi ($V \times 10$)	48
6.2. Mod 2	49
6.2.1. Piezoelektrik Çıkış Gerilimi	50
6.2.2. Doğrultucu Çıkış Gerilimi	50
6.2.3. Kondansatör Çıkış Gerilimi	51
6.3. Mod 3	52
6.3.1. Piezoelektrik Çıkış Gerilimi (Tek)	52
6.3.2. İki Piezoelektrik İle İki Doğrultucu (Seri Durumunda)	52
6.3.2.1. Doğrultucu Çıkış Gerilimi	53
6.3.2.2. Kondansatör Çıkış Gerilimi	54
6.3.3. Üç Piezoelektrik İle Üç Doğrultucu (Seri Durumunda)	54
6.3.3.1. Doğrultucu Çıkış Gerilimi	55
6.3.3.2. Kondansatör Çıkış Gerilimi	56
6.3.4. Dört Piezoelektrik İle Dört Doğrultucu (Seri Durumunda)	56
6.3.4.1. Doğrultucu Çıkış Gerilimi	57
6.3.4.2. Kondansatör Çıkış Gerilimi	58
6.3.5. İki Piezoelektrik Elemanı Seri Durumunda Bağlanması	58
6.4. Mod 4	59
6.4.1. İki Piezoelektrik İle İki Doğrultucu (Paralel Durumunda)	59
6.4.1.1. Doğrultucu Çıkış Gerilimi	59
6.4.1.2. Kondansatör Çıkış Gerilimi	60
6.4.2. Üç Piezoelektrik İle Üç Doğrultucu (Paralel Durumunda)	60
6.4.2.1. Doğrultucu Çıkış Gerilimi	61
6.4.2.2. Kondansatör Çıkış Gerilimi	61
6.4.3. Dört Piezoelektrik İle Dört Doğrultucu (Paralel Durumunda)	62
6.4.3.1. Doğrultucu Çıkış Gerilimi	62

6.4.3.2. Kondansatör Çıkış Gerilimi.....	63
7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	66
7.1. Öneriler	67
KAYNAKLAR.....	68
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER.....	73
ÖZGEÇMİŞ.....	74



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Piezoelektrik malzemelerin etkisi	7
Şekil 2.2.	Curie sıcaklığının baryum titanatın yapısı üzerindeki etkisi	8
Şekil 2.3.	Curie sıcaklığının üstünde ve altında PZT hücre şekli	11
Şekil 2.4.	Ekipman a probunun yapısı	13
Şekil 2.5.	Piezoelektrik malzemelerin kullanımları	14
Şekil 2.6.	Piezoelektrik malzemenin şematik diyagramı	17
Şekil 2.7.	Piezoelektrik jeneratör paralel mod da çalıştırması	17
Şekil 2.8.	Piezoelektrik malzemelerin elektrik modeli	20
Şekil 2.9.	Dirençli piezoelektrik malzemelerin elektrik modeli	21
Şekil 2.10.	Gerilim kaynakla piezoelektrik malzemelerin elektrik modeli	21
Şekil 3.1.	Tek kanatlı bir rüzgar türbinini	24
Şekil 3.2.	Üç kanatlı rüzgar türbinini	25
Şekil 3.3.	Çok kanatlı rüzgar türbinini	26
Şekil 3.4.	Savonious rüzgar türbinleri	27
Şekil 3.5.	Darrieus rüzgar türbinleri	28
Şekil 3.6.	H-Darrieus rüzgar türbinleri	29
Şekil 4.1.	Rüzgar enerjisi hasat sistemi	34
Şekil 4.2.	Diyot köprü doğrultucu	35
Şekil 4.3.	Düşüren dönüştürücü: (a) Devre şeması, (b) Açma eşdeğer devresi (c) Kapama eşdeğer devresi	37
Şekil 4.4.	Yükselten dönüştürücü: (a) Devre şeması, (b) Açma eşdeğer devresi (c) Kapama eşdeğer devresi	37
Şekil 4.5.	Yükselten dönüştürücü gerilimi ve akım dalga biçimleri	38
Şekil 4.6.	Yükselten dönüştürücü bobin akımı dalga formu $i_L(t)$	39
Şekil 4.7.	Düşüren -Yükselten dönüştürücü: (a) Devre şeması, (b) Açma eşdeğer devresi (c) Kapama eşdeğer devresi	40
Şekil 4.8.	Deşarj sırasında tek bir pil hücresinin temel işlevi	41
Şekil 5.1.	Piezoelektrik jeneratörün tabanı	42
Şekil 5.2.	a) Piezoelektrik malzeme , b) Piezoelektrik malzeme yapısı , c) piezoelektrik malzeme inşaatı	43
Şekil 5.3.	Tasarlanan savonius rüzgar türbinleri	44
Şekil 5.4.	a) Mıknatıs malzemeler, b) Piezoelektrik malzemeler üzerindeki mıknatıslar	45
Şekil 5.5.	Önerilen enerji hasatçısı tasarımı	45
Şekil 5.6.	Piezoelektrik çıkış gerilimi ile elektronik devre bağlanması	46
Şekil 6.1.	Seri devre bağlantısı	47
Şekil 6.2.	Piezoelektrik çıkış gerilimi	47
Şekil 6.3.	Doğrultucu çıkış gerilimi (probe x10)	48
Şekil 6.4.	Kondansatör çıkış gerilimi	48
Şekil 6.5.	Paralel devre bağlantısı	49
Şekil 6.6.	Piezoelektrik çıkış gerilimi	50
Şekil 6.7.	Doğrultucu çıkış gerilimi	50
Şekil 6.8.	Kondansatör çıkış gerilimi	51
Şekil 6.9.	Tek piezoelektrik çıkış gerilimi	52
Şekil 6.10.	Doğrultucu çıkış gerilimi	53
Şekil 6.11.	Doğrultucu çıkış gerilimi (Büyütölmüş hali)	53

Şekil 6.12.	Kondansatör çıkış gerilimi	54
Şekil 6.13.	Kondansatör çıkış gerilimi	55
Şekil 6.14.	Doğrultucu çıkış gerilimi (Büyütülmüş hali)	55
Şekil 6.15.	Kondansatör çıkış gerilimi	56
Şekil 6.16.	Doğrultucu çıkış gerilimi	57
Şekil 6.17.	Doğrultucu çıkış gerilimi (Büyütülmüş hali)	57
Şekil 6.18.	Kondansatör çıkış gerilimi	58
Şekil 6.19.	Frekans ile gerilim değişimi	58
Şekil 6.20.	Doğrultucu çıkış gerilimi	59
Şekil 6.21.	Doğrultucu çıkış gerilimi (Büyütülmüş hali)	59
Şekil 6.22.	Kondansatör çıkış gerilimi	60
Şekil 6.23.	Doğrultucu çıkış gerilimi	61
Şekil 6.24.	Doğrultucu çıkış gerilimi (Büyütülmüş hali)	61
Şekil 6.25.	Kondansatör çıkış gerilimi	61
Şekil 6.26.	Doğrultucu çıkış gerilimi	62
Şekil 6.27.	Doğrultucu çıkış gerilimi (Büyütülmüş hali)	63
Şekil 6.28.	Kondansatör çıkış gerilimi	63

TABLÖLAR DİZİNİ

Table 2.1.	Piezoelektrik Malzemelerin Kimyasal Formülleri	9
Tablo 3.1.	Türbinlerin Boyuta Göre Karşılaştırılması	29
Tablo 3.2.	Türbinler Rüzgarı Nasıl Aldıklarına Göre Karşılaştırılması.....	30
Tablo 3.3.	Kanat Tiplerine Göre Türbin Karşılaştırılması	30
Tablo 5.1.	Piezoelektrik Aktüatörün Özellikleri	43
Tablo 6.1.	Paralel ve Seri Durumu Arasındaki Sonuçları Karşılaştırması	52
Tablo 6.2.	Paralel ve Seri Durumu Arasındaki Sonuçları Karşılaştırması	64
Tablo 6.3.	Paralel Durumları Arasındaki Sonuçları Karşılaştırması	64
Tablo 6.4.	Seri Durumları Arasındaki Sonuçları Karşılaştırması	64
Tablo 6.5.	(Kocaeli – İzmit – Yenişehir)’ de Rüzgar Hızı	65



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

W	: Watt
kW	: Kilo watt
MW	: Milyon watt
mW	: Miliwatt
v, V	: Gerilim
J	: Joule
mm	: Millimeter
dcv	: DC gerilim
mN	: Millinewton
m/sn	: Metre/saniye
μ W	: Mikrowatt
NeFeB	: Neodymium mıknatısı
s	: Saniye

RÜZGAR TAHRİKLİ PİEZOELEKTRİK JENERATÖRLER KULLANARAK ENERJİ HASADI

ÖZET

Nüfustaki büyük artış ve insanların ihtiyaçlarını karşılamak için fabrikalara olan ihtiyaçla birlikte, elektrik enerjisi talebi çarpıcı bir şekilde arttı ve klasik jeneratörlerin yüksek yakıt, sürekli bakım maliyeti ile ve işletme maliyetleri olmadan elektrik enerjisi elde etmek için ileri teknolojinin kullanılması kaçınılmaz olmuştur.

Piezoelektrik malzemeler, mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmenin yanı sıra elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürme yeteneğine de sahiptir. Bu çalışmada, piezoelektrik kristallerin mekanik enerjiden elektrik enerjisine dönüşüm yapmak için rüzgar tahrikli bir sistem önerilmiştir. Küçük güçlü bir rüzgar türbini kullanılarak üretilen dönme hareketi, piezoelektrik kristalde mekanik bir salınım oluşturmak için kullanılmıştır. Rüzgar türbini olarak 2 ve 3 kanatlı (Savonius) türbini kullanılmıştır. Bu türbinlerin birincisi iki kanattan, diğeri ise üç kanattan oluşmaktadır. Her iki tip çapı 3.5 inç, yüksekliği 6 inçtir. Türbinle birlikte hareket eden mıknatısların yanında piezo kristallerin üzerine de mıknatıslar yerleştirilmiştir. Piezoelektrik kristallerin üzerine yerleştiriliren mıknatısların türbin miline bağlı mıknatıslar tarafından çekilmesi ve itilmesi yoluyla piezoelektrik kristal dönüş hızına bağlı titreşerek enerji üretmesi planlanmıştır. Bu sayede elektrik enerjisi üretilmektedir. Üretilen enerji depolanarak ihtiyaç halinde kullanılabilir. Önerilen cihaz yol kenarlarına konularak geçen araçların ürettiği rüzgar enerjisi ile çalışması planlanmıştır. Böylece depolanan enerji ihtiyaç duyulan aydınlatma mobil şarj cihazı gibi yüklerin beslenmesinde kullanılabilmesi mümkün olacaktır.

Anahtar Kelimeler: Elektrik Üretimi, Enerji Hasadı, Piezoelektrik Titreşim, Piezoelektrik, Rüzgar Enerjisi, Savonius Rüzgar Türbini.

ENERGY HARVESTING USING WIND DRIVEN PIEZOELECTRIC GENERATORS

ABSTRACT

With the huge increase in population and the need for factories to meet people's needs, the demand for electrical energy has increased dramatically, and it has become inevitable to use advanced technology to obtain electrical energy from conventional generators with high fuel, continuous maintenance cost and no operating costs.

In addition to converting mechanical energy to electrical energy, piezoelectric materials also have the ability to convert electrical energy to mechanical energy. In this study, a wind driven system is proposed to convert from mechanical energy to electrical energy using piezoelectric crystals. The rotational motion produced using a small powerful wind turbine has been used to create a mechanical oscillation in the piezoelectric crystal. Two and three bladed (Savonius) turbines were used as wind turbines. Both types are 3.5 inches in diameter and 6 inches in height. In addition to the magnets moving with the turbine, magnets are placed on the piezo crystals. It is planned that the magnets placed on the piezoelectric crystals will produce energy by vibrating depending on the rotation speed of the piezoelectric crystal by being attracted and pushed by the magnets connected to the turbine shaft. In this way, electrical energy is produced. The produced energy can be stored and used when needed. The proposed device is planned to work with wind energy produced by passing vehicles by placing it on the roadside. Thus, it will be possible to use the stored energy to feed the required loads such as lighting, mobile chargers.

Keywords: Electricity Generation, Energy Harvesting, Piezoelectric Vibration, Piezoelectric, Savonius Wind Turbine, Wind Power.

1. GİRİŞ

Dünyada artan enerji talebini karşılamak için herkes alternatif enerji kaynaklarına yönelmiştir. Ayrıca üretilen enerjinin düşük yakıt maliyetli olması da istenmektedir. Fosil yakıtlar hâlâ baskın enerji kaynağı iken, kaynaklar tükenme eğilimi göstermeye başladığında diğer enerji kaynaklarını tercih edilmektedir. Mekanik ve titreşim tabanlı tasarımlar da günlük hayatta enerji kaynağı olarak kullanılabilir. Günümüzde küçük elektronik cihazlar ve kablosuz sensörler gibi düşük güçlü cihazların kullanımı ve kendi enerjisini sağlayan cihazlara olan talep artmaktadır. Elektrik enerjisi ihtiyacını karşılamak için piller kullanılmaktadır, ancak pillerin kısa ömürlü olmaları, tükendiklerinde insan müdahalesine ihtiyaç duymaları, geri dönüşüm sürecinin karmaşık ve pahalı olması gibi kullanımlarını azaltan bazı dezavantajları vardır. Bu nedenle alternatif kaynaklardan elektrik enerjisi üretiminde kullanımı ile ilgili yeni teknikler ve çalışmalar başlamıştır. Alternatif enerji kaynakları arasında güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, termal enerji, akustik gürültü ve mekanik titreşimler gibi doğal enerji kaynakları da yer almaktadır. Rüzgar enerjisi ile mekanik titreşimler ile enerji üretimi avantajlıdır. Çünkü güneş enerjisi geniş bir alanı gerektirir ve ışığın yoğunluğu hava şartlarına bağlıdır ve güneş enerjisi gün içinde güneşin varlığına ve güneş enerjisine bağlıdır. Gün içinde güneşin varlığı 8-11 saat arasındadır ve kısa bir süre olan güneş enerjisinden elektrik üretmek için yararlanılmaktadır. Ayrıca güneş pillerinin maliyetleri yüksek olabilmektedir. Güneşin olmadığı gece vakitlerinde veya kışın bulutlu ve yağışlı havalarda hareketten enerji üreten piezoelektrik sistemlerinden enerji üretimi mümkündür. Bu hareket için rüzgar enerjisinden yararlanma imkanı vardır. Araçların hareketi ile oluşan rüzgarların yanında insanların hareketi, mekanik titreşimler gibi veya diğer hareket kaynaklarından elektrik enerjisi elde edilebilmektedir. Diğer enerji kaynakları olarak büyük sıcaklık gerektiren termal enerji, yüksek gürültü seviyelerine ihtiyaç duyan ve sesin yayılma yönüne duyarlı akustik gürültü enerjileri sayılabilir. Piezoelektrik malzemeler mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürme yeteneğine sahip olduğundan ve enerji dönüşümü için harici bir kaynağa ihtiyaç duymadığından, mekanik titreşimlerden elektrik enerjisi elde etmek için kullanılan uygulamaların çoğu piezoelektrik kristalleri ile yapılmaktadır. Titreşim enerjisi elde etmek için, en hızlı ve en verimli türbinlerden biri olan ve rüzgar enerjisi olduğunda harici bir kaynağın müdahalesi olmadan otomatik olarak dönmeye başlayan küçük ölçekli bir rüzgar türbini (Savonius)

tasarımı önerilmiştir. Piezoelektrik kristalde mekanik bir salınım oluşturmak için manyetik çekim ve itme etkilerinden istifade edilerek elektrik enerjisine dönüştürülmektedir.

1.1. Motivasyon

Piezoelektrik enerji hasat sistemleri, iki kapalı radyal yapıda iki piezoelektrik katman arasında elastik bir katman sıkıştırılarak üretilmektedir. Rüzgar jeneratörleri piezoelektrik jeneratörler ile birleştirilir ve piezoelektrik jeneratörlerden elektrik enerjisi elde edilmektedir. Bu tezin temel amacı, önceki çalışmalardan farklı olarak, kullanılmayan rüzgar enerjisini, araçların hareketi ile üretilen rüzgar enerjisinden faydalanarak kullanılabilir elektrik enerjisine dönüştürmek ve depolayarak ihtiyaç durumunda kullanılması için bir sistem tasarlanmaktadır. Elektrik enerjisi üretmek için en iyi modeli keşfetmek için iki model rüzgar türbini (Savonius) oluşturulmuştur. Türbininin ilk modeli iki kanattan oluşmaktadır. Onu döndürmek için yeterli rüzgar enerjisine maruz kaldığında dönmeye başlamaktadır. Ayrıca türbinin mile bağlı mıknatıslar türbinin mile ile birlikte dönmeye başlamaktadır. Piezoelektrik malzemelerin üzerine yerleştirilen mıknatıslar ile türbinin mile takılan mıknatışlar arasındaki çekim ve itmenin bir sonucu olarak, piezoelektrik malzemeler, mıknatıslar arasındaki çekim ve itme işlemlerinden kaynaklanan elektromanyetik kuvvet sonucunda titreşmeye başlamaktadır. Buna karşılık, piezoelektrik malzemeler mekanik titreşimleri elektrik yüklerine dönüştürmektedir. Diğer rüzgar türbini modeli ise üç kanattan oluşmakta olup, iki kanatlı rüzgar türbini ile aynı boyut ve tasarım yöntemine sahiptir. Bu tez aynı zamanda tasarımın ekonomik maliyetini de göz önünde bulundurarak elektrik enerjisini hasat etmek için piezoelektrik jeneratörlü ideal bir rüzgar türbini modeli tasarlamayı amaçlamaktadır.

1.2. Tezin Amacı

Bu tezin temel amacı, piezoelektrik kristallerin mekanik titreşimlerinden yararlanarak piezoelektrik özelliklere sahip enerjiyi sentezlenmektedir. Rüzgarla çalışan piezoelektrik jeneratör, elektrik enerjisini çok verimli bir şekilde üretmek için tasarlanmıştır. Ayrıca önerilen tasarım, sürekli ve uygun maliyetle elektrik enerjisi üretebileceğimiz, araçların hareketiyle oluşan rüzgardan faydalanmak için yol kenarlarına konularak üzerine yerleştirilmesini hedeflenmektedir.

Bu nedenle, iki model rüzgar türbini (Savonius) tasarlanmaktadır ve türbinin üretimi için bir katlanabilir plastik levha kullanılmaktadır. Bu tip türbin, yüksek dönüş hızı nedeniyle seçilmiştir ayrıca dönmesi için insan müdahalesine ihtiyaç duymadığından rüzgar hızı dönmeye yeterli olduğunda dönmeye başlamaktadır. Dört adet (NeFeB) mıknatısı kullanılmaktadır. Her piezoelektrik malzemenin üzerinde ucuna bir mıknatıs takılmaktadır. Ancak piezoelektrik kristal hareket ettiğinde üzerine takılan mıknatıslar türbine bağlı mıknatıslarla temas etmez, aynı şekilde bu modelin uzun süre çalışmasını sağlamaktadır. Türbine bağlı mıknatıslar ile döndüğünde, piezoelektrik malzemeler takılan mıknatıslar ile çekim ve itme sonucunda elektromanyetik bir kuvvet oluşmaktadır. Sonuç olarak, piezoelektrik malzemeler titreşmeye başlar ve böylece elektrik enerjisini üretimi sağlanmış olmaktadır.

1.3. Bölümler

İkinci bölümde, Piezoelektrik malzemelerin tarihçesi, Mekanik titreşimlerden enerji hasadı, Enerji üretimi ve piezoelektrik etki, Currie sıcaklığı, Piezoelektrik malzemeler, Piezoelektrik malzemelerin uygulamaları, Piezoelektrik malzemeleri etkileyen faktörler, Matematiksel model ve piezoelektrik malzemelerin elektrik modeli ile ilgili araştırmaları anlatılmıştır.

Üçüncü bölümde, Rüzgar enerjisi, rüzgar türbinleri, Yatay rüzgar türbinleri, Dikey rüzgar türbinleri, Eğik rüzgar türbinleri, Rüzgar türbini modelleri karşılaştırılması, Rüzgar enerjisi matematiği ve Önceki çalışmalar anlatılmıştır.

Dördüncü bölümde, Güç dönüştürücü ve enerji depolanması, Diyot köprü doğrultucu, Filtre devresi, DC-DC dönüştürücü, Batarya anlatılmıştır.

Beşinci bölümde, Önerilen piezoelektrik enerji hasatçısının yapısı, Savonius rüzgar türbinler tasarımı, Manyetik tasarım, Elektronik devre tasarımı anlatılmıştır.

Altıncı Bölümde, Sonuçlar, Mod 1, Mod 2, Mod 3, Mod 4 anlatılmıştır .

Yedinci Bölümde, Sonuçlar ve tartışma, Öneriler anlatılmıştır.

2. PİEZOELEKTRİK MALZEMELER

2.1. Piezoelektrik Malzemelerin Tarihçesi

"Piezoelektrik" adı, her ikisi de geçmişte elektrik kaynağı olarak kullanılan Yunanca "press" ve "amber" kelimelerinden gelmektedir. Piezoelektrik, elektrik üretmek için gizli ısı ve basıncın kullanılmasının sonucudur. Mekanik stresler uygulandığında, belirli seramik kristalleri, DNA, kemik ve bazı proteinler gibi biyolojik malzemeler dahil olmak üzere çeşitli katı malzemelerde elektrik yükü birikebilir ve sonuç, basınç ve/veya gizli ısı tarafından oluşturulan bir tür elektrik olan piezoelektriktir (APC International Ltd,2006). İki Fransız bilim adamı olan Jacques ve Pierre Curie, 1880'de Paris'teki Faculté des Sciences'da laboratuvar asistanı olarak çalışıyorlarmıştır. Kuvars, turmalin ve Rochelle tuzu gibi kristallerin basıncının yüzeylerinde elektrik yükleri ürettiğini keşfetmişlerdir. Bazı kristal minerallerin karakteristik bir özelliği kabul edilmiştir. Piezoelektrik kristaller, mekanik kuvvete maruz kaldıklarında elektriksel olarak polarize olmaktadır. Piezoelektrikliğin doğrudan etkisi, mekanik enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesidir. "Piezo" kelimesi Yunanca "basınç" kelimesinden gelmektedir. Termodinamiğin temel ilkelerinden matematiksel bir türetme ile Gabriel Lippmann 1881'de belirli malzemelere bir elektrik alanı uygulamanın dahili bir mekanik stres yarattığını gözlemlemiştir. Curies, test yoluyla ters piezoelektrik etkiyi hızlı bir şekilde gösterilmiştir. Piezoelektrikliğin keşfi bilim camiasının merakını uyandırdı ve on dokuzuncu yüzyılın son çeyreğinde piezoelektrik yeni bir çalışma alanı olarak ortaya çıkmıştır. 1910'da Woldemar Voigt'in Lehrbuch der Kristallphysik (Kristal fiziği üzerine ders kitabı) piezoelektrik olaylarının meydana geldiği 20 tür doğal kristalin ayrıntılarını vermiştir. Birinci ve İkinci Dünya Savaşları arasındaki yıllarda, mikrofonlar, ivmeölçerler, fonograf yakalama cihazları ve sinyal filtreleri gibi piezoelektrik kristaller için birçok yeni kullanım icat edilmiştir (Campbell ve diğ., 2017a). 1917'de Paul Langevin ve Fransız meslektaşları, denizaltılar için, dönüştürücüsü, dalgıç bir mahfazaya monte edilmiş, iki çelik plaka (yaklaşık 50 kHz rezonans frekansına sahip) arasına sıkışmış ince kuvars kristallerinden oluşan bir mozaik olan bir ultrasonik dedektör geliştirilmiştir. Sualtında yüksek frekanslı bir "dikizleme" üretme ve savaştan sonra üzerinde çalışarak dönüş yankısını zamanlayarak derinliği belirleme hedeflerine ulaşmışlardır (Mcgahey, 2009). Cady, Kasım 1918'de General Electric ve Columbia Üniversitesi Araştırma Laboratuvarı'ndaki araştırmacılarla sualtı alıcıları üzerinde

çalışırken, sualtı ses dalgalarını 3 mil mesafeden tespit edebilen bir rochelle tuz mikrofonu yapmayı başarmıştır. Cady ilk olarak Şubat 1921'de bir piezoelektrik rezonatörü tanımlamıştır. O yıl daha sonra bir piezoelektrik osilatör tanımlanmıştır (Campbell ve diğ., 2017b). 1959 yılına gelindiğinde, kuvars kristallerinin piezoelektrik özelliklerini kullanan on milyonlarca cihaz radyo, telefon ve elektronik zaman tutma teknolojilerinde kullanılıyordu. İlk uygulaması su altı teknolojisinde olmuştur. Piezoelektrik malzeme denizaltıların yerini tespit etmek için kullanılmıştır, bu teknolojinin adı sonardır (Mcgahey, 2009). Kawai, 1969'da (PVDF) polarize bir floropolimer olan poliviniliden florürde dikkate değer piezo aktivite keşfetmiştir. Naylon ve PVC gibi diğer malzemeler bir etkiye sahipken, PVDF ve polimerleri en fazla piezoelektriktir (Piezofilm sensors technical manual, 1999). Piezoelektrik teknolojinin uygulaması, elektrikli cihazların ihtiyaç duyduğu enerjiyi sağlama yeteneğinin bir sonucu olarak o zamandan beri büyümüştür, günümüzde bu çalışmanın çeşitli versiyonları, elektronik enstrümanlara sahip önde gelen vurmali çalgı üreticileri tarafından sunulmaktadır. Bir diğer uygulama alanı da bu tezin konusu olan elektrik üretimidir. Fosil yakıtların tükenmesi ve çevreye verilen zarar nedeniyle yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması tavsiye edilmektedir. Piezoelektrik malzemeler güneş enerjisi, rüzgar enerjisi ve jeotermal enerji gibi yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Bu nedenle elektrik üretmek için kullanılmaktadır. Bu alanda birçok çalışma bulunmaktadır.

2.2. Mekanik Titreşimlerden Enerji Hasadı

Mekanik titreşimlerden elektrik enerjisi üretimine yönelik çalışmalar artmaktadır. Son yıllarda mekanik titreşimlerin ürettiği elektrik enerjisinin önemi giderek artmakta ve amaç, mekanik titreşimler yoluyla en yüksek oranda elektrik enerjisi üretimi elde edilmektedir. En önemli mekanik titreşimlerden biri de basınca dayalı titreşimler ve bu enerjinin daha sonra kullanabileceğimiz elektriğe dönüştürülmesidir. 1996 yılında Williams ve Yates bu çalışmada titreşimli bir malzemeye implante edildiğinde mekanik enerjiden elektrik üreterek bir çözüm önerilmiştir. Titreşim ve basınçtan elektrik enerjisi üretmenin üç yöntemi vardır:

1- Piezoelektrik transformatörler (Erturk, 2009), (Roundy ve diğ., 2003), (Jeon ve diğ., 2005) Piezoelektrik transformatörler, diğer transformatörlere kıyasla elektrik enerjisi elde

etmek için en iyi transformatör türleri olarak kabul edilmektedir çünkü boyutları küçüktür ve 20v gerilimden fazla üretme yeteneğine sahiptir (Ortiz ve diğ., 2013).

2- Elektrostatik transformatörler (Mitcheson, 2004) Güç toplamak için bir tür değişken kapasitör kullanan elektrostatik cihazlar, elektromanyetik cihazlara göre çok daha düşük güç seviyeleri (10 ila 40 μ W) üretir ve bunlara güç sağlamak için pil gibi harici bir elektrik kaynağı gerektirmektedir (Ortiz ve diğ., 2013).

3- Elektromanyetik transformatörler (Arnold, 2007), (Williams ve Yates, 1995) Elektromanyetik bobinler, Faraday'ın endüksiyon yasasına dayalı olarak daha büyük güçler yaratır, olası aralıklar 20 μ W ile 200 mW arasındadır. Bununla birlikte, genellikle daha büyüktürler ve ortaya çıkan çıkış gerilimleri düşüktür (>1 v), ancak ek anahtarlama fazları gerekmektedir (Ortiz ve diğ., 2013).

Diğer enerji hasat yöntemleriyle karşılaştırıldığında, piezoelektrik enerji hasadı şu avantajları sunmaktadır: yüksek enerji yoğunluğu, kullanım kolaylığı ve farklı ölçeklerde titreşim enerjisini hasat etmek için piezoelektrik malzemelerin üretim yetenekleri: makro, mikro ve nano ölçekte ölçeklerdir (Ali ve Nagib, 2012). Titreşim tabanlı enerji hasat sistemlerinde piezoelektrik malzemeler kullanılmaktadır. Katı malzemelerdeki elektrik yükleri sisteminde pozitif ve negatif elektrik yüklerinin ayrımının bir ölçüsü olan elektrik dipol momentlerinin varlığı nedeniyle, bir piezoelektrik malzeme deforme olduğunda potansiyel bir fark yaratabilmektedir (Avşar, 2016).

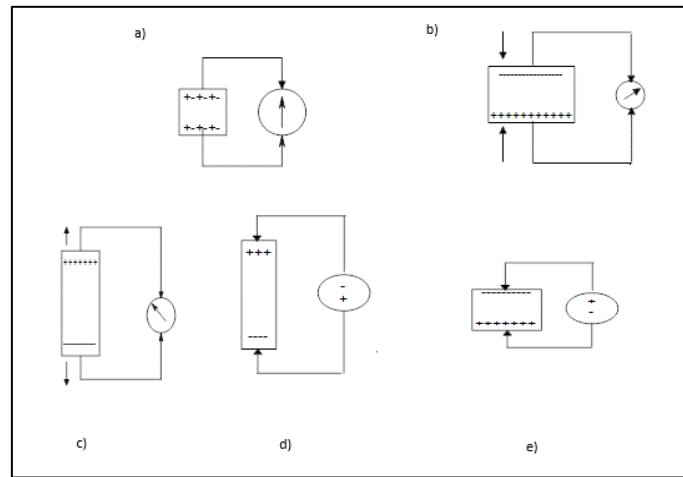
2.3. Enerji Üretimi ve Piezoelektrik Etkisi

Piezoelektrik malzemeler, kendilerine uygulanan mekanik kuvvete ve maruz kaldıkları elektrik gerilimlerine bağlı olarak farklı şekillerde tepki veren kristal malzemelerdir. Piezo yapısı için en önemli faktör, bu kristal malzemelerin simetri gösterip göstermediğidir. Simetrik malzemelerde piezoelektrik oluşmazdır (Ballato, 1996).

Simetrik malzemelerde pozitif ve negatif iyonları polarize etmek çok zordur çünkü simetrik bir malzemenin son yörüngesindeki elektronlar çekirdeğe daha fazla çekilmektedir. Bu simetrik malzemelerin piezoelektrik yetenekleri yoktur çünkü bir elektrik alanı oluşturamazlardır. Piezoelektrik kristal malzemedeki polarizasyon yoksa, pozitif ve negatif parçacıklar dengededir. Dengede, bu yapı elektriksiz olarak nötrdür. Bu yüksüz malzemelere dışarıdan bir mekanik kuvvet uygulandığında, malzemenin zıt taraflarında zıt pozitif (+) ve negatif (-) yükler oluşturmaktadır. Polarizasyon, eksen yönü

boyunca bir malzeme yapısında iyonların düzenlenmesini ifade edilmektedir. Piezoelektrik malzemeler, titreşim yoluyla elektrik üreten malzemelerdir. Curie noktasının hemen altındaki bir sıcaklıkta malzemeleri polarize etmek için güçlü bir elektrik alanı kullanılmaktadır. Piezoelektrik malzemeyi sıkıştırarak veya gererek, mekanik enerji elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Piezoelektrik etki, bu malzemenin özelliğine verilen addır (Özhan, 2019).

Kristalleri kullanan çalışmalar, piezoelektrik özelliklere sahip bir malzemeye basınç uygulandığında malzemelerin yüzeylerinde elektrik yüklerinin üretiminin doğrudan piezoelektrik etki olarak bilindiğini gösterilmiştir. Sürekli polarizasyona sahip asimetrik bir iyonik kristalin kutupları arasındaki mesafe, uygulanan basınçla doğru orantılı olarak azalır ve yüzeyindeki yük birikimi değişmektedir. Sonuç olarak, kutuplar arasında bir iletken ile eşleştirildiğinde akım üreten bir gerilim farkı vardır. Elektrotlar bir elektrik alanı ile beslendiğinde piezoelektrik malzeme deforme olurken, elektrik yükünün yoğunluğu malzemeye uygulanan basınçla doğru orantılıdır. Ters piezoelektrik etki bu özelliğe verilen addır. Sensör olarak doğrudan etkili piezoelektrik malzemeler kullanılırken, ters piezoelektrik etki, malzemelerin sistemlerde uyarıcı olarak kullanılmasına olanak tanımaktadır (Çetin, 2015).



Şekil 2.1. Piezoelektrik malzemelerin etkisi

Şekil 2.1, piezoelektrik malzemelerin etkisini gösterilmektedir:

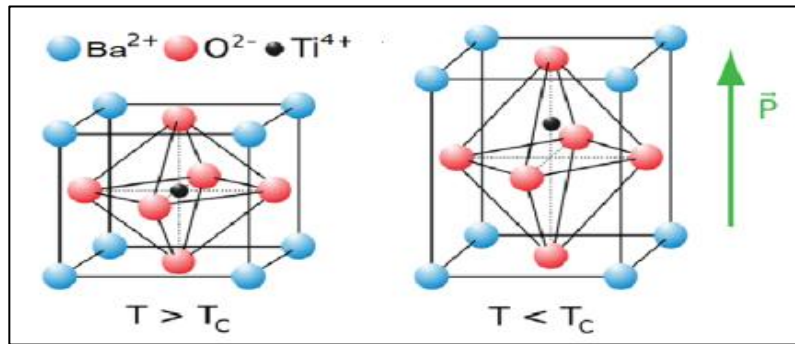
- a) Piezoelektrik malzemelerde Pozitif ve negatif parçacıklar dengededir.
- b) Malzemeye bir basma kuvveti sağlanması sonucunda pozitif bir gerilim oluşmaktadır.
- c) Bir çekme kuvveti uygulandığında, negatif bir gerilim üretilmektedir.

- d) Polarizasyon aynı yönde gerilim uygulanması sonucu malzeme uzamaktadır.
- e) Polarizasyon yönünün tersi yönde gerilim uygulanması sonucu malzeme kısalmaktadır.

Direkt piezoelektrik etki Şekil (2.1 b ve c)'de gösterilmiştir (basma ve çekme kuvvetlerinde). Ters piezoelektrik etki ise Şekil (2.1 d ve e)'de gösterilmiştir.

2.4. Curie Sıcaklığı

T_c veya Curie sıcaklığı, piezoelektrik özelliklere sahip bir malzemenin bu özelliği gösterdiği sıcaklık aralığıdır. Polar ve polar olmayan piezoelektrik malzemelerde curie sıcaklığı farklı şekilde uygulanmaktadır. Polar olmayan piezoelektrik malzemelerin kristal yapısı curie sıcaklığının altında merkezi simetriye sahip değildir ve piezoelektrik yetenekler sergilemektedir. Bu malzemelerin kristal yapısı merkezi simetrik olur curie sıcaklığının üzerinde piezoelektrik yeteneğini kaybetmektedir. Curie sıcaklığının altında, tüm piezoelektrik malzemeler piezoelektrik yetenekler sergiler ve curie sıcaklığı bir malzemenin özelliğidir. Her maddenin curie sıcaklığı değişmektedir. Örneğin bir (Baryum titanat BT) kristali 120 santigrat derecede kürlenmektedir. BT kristali curie sıcaklığının üzerinde kübiktir. Kristal yapı, Şekil 2.2' de görüldüğü gibi 120 santigrat derecenin altında deforme olmaktadır (Akgün, 2018), (Hummel, 2011).



Şekil 2.2. Curie sıcaklığının baryum titanatın yapısı üzerindeki etkisi (Akgün, 2018)

2.5. Piezoelektrik Malzemeler

Piezoelektrik özellikler sergileyen birkaç malzeme üretilmiştir. En eski piezoelektrik kristal olan kuvars ve hala en önemlilerinden biridir. Sentetik kuvars, piezoelektrik malzeme talebinin çoğunu karşılamaktadır. İkinci Dünya Savaşı sırasında yaklaşık 75 milyon kuvars levha yapıldı ve doğal hammaddelerin kıtlasıyla her boyutta üretime

izin vererek sentetik ve sentetik kristaller oluşturulmuştur. 1920'lerde J. Valasek, rochelle tuzunun ferroelektrik etkisini keşfetti, rochelle tuzu suda çözündüğünden, elektromekanik kuplaj katsayısı kısıtlandığından, 1935 yılında ilk endüstriyel piezoelektrik kristaller sentezlendiğinden ve tüm kristal, seramik ve polimer malzemeler piezoelektrik özelliklere sahip olduğundan güç transformatörlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Kuvars, rochelle tuzu gibi mineraller, baryum titanat (BT), kurşun zirkonat titanat (PZT) gibi seramik monomerler, iki veya üç bileşenli seramik malzemeler, poliviniliden diflorür (PVDF) gibi polimerler ve kompozitlerin tümü piezoelektrik özelliklere sahiptir. Yoğun ve gelişmiş piezoelektrik özellikler son yıllarda geliştirildi ve malzeme biliminin ilerlemesi ile yeni, kullanışlı, entegre edilmesi kolay ve verimli çok işlevli kompozit malzemelerin üretimi ve kullanımı büyümektedir. Piezoelektrik kristaller, piezoelektrik seramikler, piezoelektrik polimerler ve piezoelektrik kompozitler, dört tip piezoelektrik malzemedir. Malzeme, çalışma koşullarına, kullanım amacına ve alete uygun piezoelektrik malzemeden yapılmıştır (Akgün, 2018). Tablo 2.1, yaygın olarak kullanılan piezoelektrik malzemelerin adlarını ve kimyasal formüllerini listelerdir.

Table 2.1. Piezoelektrik Malzemelerin Kimyasal Formülleri

Piezoelektrik Malzemelerin İsmi	Kimyasal Formülü
Kuvars	SiO_2
Rochelle tuzu	$\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot \text{HH}_2\text{O}$
Baryum titanat (BT)	BaTiO_3
Kurşun zirkonat titanat (PZT)	$\text{Pb}(\text{Zr}_{0,52}\text{Ti}_{0,48})\text{O}_3$
Lityum niobat	LiNbO_3
Lityum sülfat	$\text{LiSO}_4\text{H}_2\text{O}$
Lityum tantalat	LiTaO_3
Amonyum dihidrojen fosfat	$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$
Turmalin	$\text{CaAl}_3\text{Mn}_6(\text{BO}_3)_3(\text{BO}_3)_3(\text{SiO}_3)_6(\text{OH})_4$
Baryum sodyum neobat	$\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$
Etilen diamin tartarat	$\text{C}_6\text{H}_{14}\text{N}_2\text{O}_6$
Kurşun baryum niobat	$\text{Pb}_{0,37}\text{Ba}_{0,63}\text{Nb}_2\text{O}_6$
Kurşun potasyum niobat	$\text{Pb}_2\text{KNb}_5\text{O}_{15}$
Kurşun niobat	PbNb_2O_6
Potasyum dihidrojen fosfat	KH_2PO_4
Çinko sülfür	ZnS

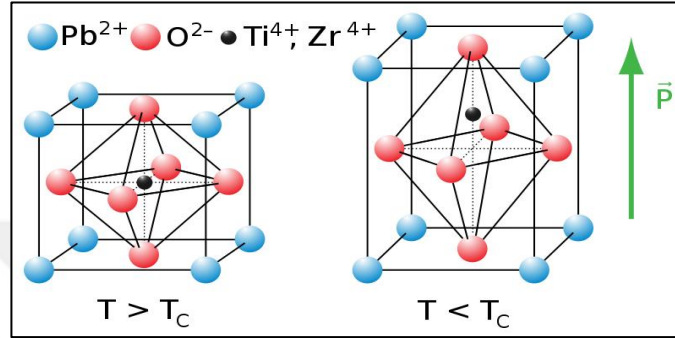
Malzeme teknolojisinin ilerlemesiyle, artık çeşitli malzeme yapılarında çok sayıda ve çeşitli piezoelektrik malzeme bulunabilmektedir. Piezoelektrik malzeme yapılarının piezoelektrik ve mekanik davranışları, kullanılan malzemelere, kullanılan üretim süreçlerine ve malzemelerin fiziksel biçimlerine bağlı olarak büyük ölçüde değişir, hangi yapının kullanılacağına karar vermeden önce farklı piezoelektrik malzemelerin özellikleri derinlemesine incelenmeli ve incelenmelidir. Herhangi bir uygulama, organik, inorganik ve piezo kompozit yapılar piezoelektrik malzemelerin üç türüdür, ancak bu yapılar çok çeşitli olduğundan, bu malzemelerin çeşitli şekillerde sınıflandırıldığı açıklamaktadır (Özhan, 2019).

2.5.1. Piezoelektrik Kristaller

İlk piezoelektrik kristaller, piezoelektrik malzemelerde tanımlanmıştır. Piezoelektrik etkiyi gösterebilmek için bu kristaller malzemelerin kristalografik yönlerine göre kesilmeli ve şekillendirilmelidir. Kuvars SiO_2 rochelle tuzu $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot \text{HH}_2\text{O}$ ve turmalin $\text{CaAl}_3\text{Mn}_6(\text{BO}_3)_3 (\text{BO}_3)_3(\text{SiO}_3)_6(\text{OH})_4$, lityum niyobat (LiNbO_3) ve lityum tantalat (LiTaO_3) Piezoelektrik özelliklere sahip en ünlü doğal kristallardır. Piezoelektrik kristal malzemeler kararlı olduğu için sensörler için idealdir ve ivmeölçer ve osilatörlerde kuvars kristalleri tercih edilmektedir. Piezoelektrik katsayısının yüksek olması nedeniyle hidrofonlarda turmalin tercih edilirken, öte yandan seramikler, piezoelektrik seramiklerin keşfiyle esasen kristal malzemelerin yerini almıştır. Lityum niyobat ve alüminyum nitrür, bugüne kadar ortak kalan iki tür piezoelektrik kristaldır. Lithium niobate kristal simetrisi PZT'ninkinden daha düşük, ancak PVDF'ninkinden daha yüksektir. Lityum niyobat, yüksek frekanslı uygulamalar için ideal hale getiren hızlı bir uzunlamasına difüzyon hızına sahiptir. Lityum Niobat, işleme sıcaklığı 1200°C 'ye kadar çıktığı için yüksek sıcaklıklarda çalışmaya uygundur. Alüminyum nitrür kristalografi açısından PZT'ye benzer, ancak özellikler açısından lityum niopata'ya benzerdir (Tressler ve diğ., 1998), (Nakamura, 2012).

2.5.2. Piezoelektrik Seramikler

En yaygın kullanılan ferroseramik ve piezoelektrik malzemeler, kurşun zirkonat titanat (PZT) ve türevleri ile baryum titanattır (BT). Mikroelektromekanik sistemlerde piezoelektrik seramikler ana fonksiyonel malzemelerdir. Operatör ve dönüştürücü uygulamaları bu tür malzemeleri tercih edilmektedir.



Şekil 2.3. Curie sıcaklığının üstünde ve altında PZT hücre şekli (Lead Titanate (PZT))

Perovskitin kristal yapısı piezoelektrik seramiklerde yaygındır. Hücre yapıları, köşelerde büyük "A" iyonları, ortada küçük "B" iyonları ve hücre yüzeylerinin merkezinde oksijen iyonları ile küplere benzerdir. Şekil 2.3' te bu hücre yapısını kurşun zirkonat titanat örneği olarak alırsak, (PZT) kurşun iyonları hücrenin köşelerinde, titanyum iyonları merkezde ve oksijen iyonları hücre yüzeyinin merkezinde yer almaktadır (Jaffe ve diğ., 1971). Elektrosramikler, piezoelektrik seramiklerin bir başka alt grubudur. Piezoelektrik özellikler tüm piezo seramik türlerinde görülebilmektedir. Curie sıcaklığı en önemli parametrelerden biridir, PZT Şekil 2.3' te gösterildiği gibi curie sıcaklığından daha yüksek sıcaklıkta simetrik bir yapıya sahiptir, hücre yapısı curie sıcaklığının altında asimetrik veya faz değişimi olmuştur. Piezoelektrik seramiklerin piezoelektrik özellikleri gösterebilmesi için onun sıcaklığını curie sıcaklığından daha düşük olması gerekmektedir (Tressler ve diğ., 1998).

Piezoelektrik seramikler yumuşak ve sert olmak üzere iki kategoriye ayrılmaktadır. Seramiğin bileşimleri ve özellikleri bu sınıflandırmayı oluşturmak için kullanılmıştır. Yüksek piezoelektrik sabitleri, dielektrik sabitleri ve piezoelektrik etkileşim sabitleri yumuşak seramiklerin en temel özellikleri arasındadır. Yumuşak piezoelektrik seramikler, bu özelliklerinden dolayı sert piezoelektrik seramiklere göre daha fazla uzama özelliğine sahiptir. Genel olarak sensör uygulamaları için harika olan katı piezoelektrik

seramikler, düşük histerezis ve yüksek curie sıcaklığına sahiptir. Diğer nitelikler açısından yumuşak seramiklerin tam tersidir, yüksek frekanslı elektrik alan uygulamaları için idealdir. PZT, günümüzde çeşitli şekillerde bulunan en yaygın kullanılan ve en önemli piezoelektrik seramik malzemedir. Amaca bağlı olarak sert veya yumuşak piezoelektrik seramikler olarak yapılabilmektedir (Nakamura, 2012).

2.5.3. Piezoelektrik Polimerler

Organik piezoelektrik malzemeler olarak da bilinen bu malzemeler, poliviniliden florür (PVDF) veya piezoelektrik polimerler olarak adlandırılan flor karbon bazlı polimerlerden oluşmaktadır. Piezoelektrik polimer malzemeler düşük direnç, düşük piezoelektrik sabiti ve yüksek gerilim sabitine sahiptir. Bu malzemelerin yapısı hafif, esnektir ve yüksek sıcaklık uygulamaları bu malzemeler için uygun değildir. Mikrofonlar, denizaltı ultrasonik yön bulma ve mesafe ölçümleri uygulama örnekleridir piezoelektrik polimerlerin kullanılmaktadır (Özhan, 2019).

2.5.4. Piezoelektrik Kompozitler

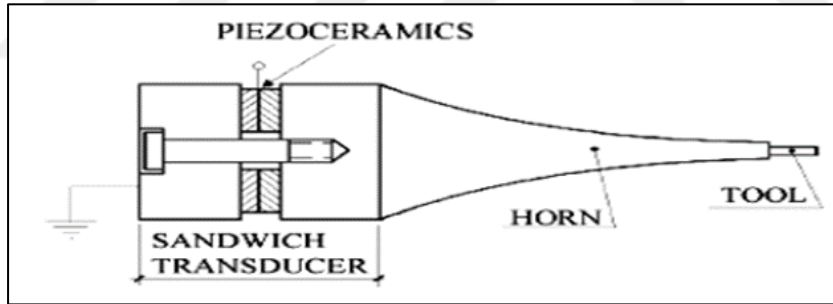
Seramik malzemeler, piezoelektrik kompozitler oluşturmak için pasif bir polimer ile birleştirilmektedir, bu grup kullanılarak çok çeşitli piezoelektrik bileşikler oluşturulabilmektedir. Bu yapıda kullanılan malzemeler yüksek reaksiyon kararlılığı, düşük direnç, mekanik esneklik ve dayanıklılık ile karakterize edilmektedir. Kompozit yapılar, yüksek piezoelektriklik, dayanıklılık, herhangi bir şekil veya boyutta üretilebilirlik özelliği ile karakterize edilmektedir. Bu malzemeler esnek yapıları nedeniyle hemen hemen her yüzeye kolayca dönebilmektedir. Esnek yapıları nedeniyle kompozit malzemeler insan kıyafetleri, tıbbi uygulamaları, yüzey altı sonar ve akış kontrol sistemleri kullanılmaktadır (Cook-Chennault ve diğ., 2008).

2.6. Piezoelektrik Malzemelerin Uygulamaları

Piezoelektrik malzemeler çok çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Keşfedildikten sonra piezoelektrik malzeme, Birinci Dünya Savaşı'na kadar bir patentte veya daha ileri bir çalışmada kullanılmamıştır. Denizaltı teknolojisi onu ilk kullanan olmuştur. Piezoelektrik malzeme kullanılarak denizaltıların yeri belirlenebilmektedir, sonar bu

teknolojinin adıdır. Aynı zamanda, Ernest Rutherford ve Paul Langevin sonar üzerinde çalışmışlar ve birbirlerinin çalışmaları hakkında hiçbir şey bilmiyorlardı. Öte yandan, sonarı yaratan Paul Langevin'dir (Mcgahey, 2009), (Katzir, 2012).

Piezoelektrik malzemeler medikal ultrasonografi cihazlarında kullanılmaktadır ve ultrason makinelerinde piezoelektrik malzemeler yardımı ile vücudun içi görülebilmektedir. Ultrason cihazlarındaki problemler vücudun içinde neler olduğunu gösterebilmektedir, bu sensörlerde piezoelektrik malzemeler kullanılmaktadır, elektrik ses dalgalarına dönüştürülebilir ve ses dalgaları piezoelektrik malzemeler kullanılarak elektrik sinyallerine dönüştürülebilmektedir, bu şekilde hem verici hem de alıcı görevi görülmektedir. Bir piezoelektrik malzemeye elektrik verildiğinde, onu mekanik enerjiye dönüştürür ve daha sonra ses dalgalarına dönüştürülür ve insanlar bu sesleri duyamazlardır, yüksek frekansı nedeniyle, organlar ses dalgalarından etkilenir ve daha sonra dokulara geri dönmektedir, bu ses dalgaları daha sonra bir piezoelektrik malzeme tarafından okunmaktadır. Sonuç olarak, görüntüler ultrason makinesi tarafından üretilmektedir. Sensörün yapısı Şekil 2.4'te gösterilmektedir (Duran ve diğ., 2006).



Şekil 2.4. Ekipman a probunun yapısı (Duran ve diğ., 2006)

Son günlerde giderek büyüyen piezo cerrahi cihazının ana malzemesi tıbbi cihazlarda yaygın olarak kullanılan piezoelektrik teknolojisidir. Mectron Medical Technology (İtalya'da), osteotomi prosedürlerinde, özellikle kozmetik tedavilerde güvenli kemik kesimi için bir araç icat etmiştir. Bu prosedür boyunca kemiği kesmek için ultrason kullanılıp yumuşak dokuların yaralanması önlenmektedir. Geleneksel dış osteotomi, ameliyat sırasında ve sonrasında kanamanın yanı sıra ödem ve rahatsızlığı azaltacak şekilde değiştirilmektedir (Robiony ve diğ., 2004), (Robiony ve diğ., 2016).

Mekanik miktarlar, piezoelektrik malzemelerin doğrudan özelliği kullanılarak ölçülmektedir. Sonuç olarak, dizel araç enjektörlerinin geliştirilmesinde piezoelektrik

malzemeler kullanılmaktadır. Motoru çalıştırmak için enjektör yakıtı enjekte edip piezoelektrik aktüatör ray sistemi dizel araçlarda ortak yakıt enjeksiyon sistemini devralmıştır. Ayrıca bu cihaz, aşamalı olarak püskürtme yapabilmektedir (Çanakçı ve Özsezen., 2004). Hasan Selçuk Çelik 2012 yılında yeni bir perküsyon ve piezoelektrik vurmali çalgı seti geliştirilmiştir. Bu yazılım ve cihazın geliştirilmesi ile vuruşların hızı ve şiddeti ile parçanın doğruluğu bilgisayar tarafından ölçülerek analiz edilebilmektedir. Plakaya basıldığında, piezoelektrik malzeme bu sinyalleri elektrik sinyaline dönüştürmektedir. Bu çalışmada, elektrik ve müziğin birleştirilebileceğini gösterilmiştir. Elektronik enstrümanlı vurmali çalgıların önde gelen üreticileri şimdi bu çalışmanın çeşitli varyasyonlarını sunmaktadır (Selek, 2012). Bu tezin odak noktası olan elektrik üretimi de bir başka uygulama alanıdır. Fosil yakıtların tükenmesi ve çevreye verilen zarar nedeniyle yenilenebilir enerji kaynaklarının benimsenmesi tercih edilmektedir. Güneş, rüzgar ve jeotermal enerji, yenilenebilir enerji kaynaklarına örnektir. Sonuç olarak, elektrik üretiminde kullanılmaktadır. Bu alanda birçok araştırma yapılmıştır.



Şekil 2.5. Piezoelektrik malzemelerin kullanımları (Akgün, 2018)

Şekil 2.5’ te piezoelektrik malzemelerin gemilerde, müzik makinelerinde, tıp bölümünde, otomobillerde ve uçaklarda kullanımını gösterilmektedir. Piezoelektrik malzemelerin birçok uygulamada kullanılabileceği ve bunlardan yararlanılabileceği anlamına gelmektedir.

2.7. Piezoelektrik Malzemeleri Etkileyen Faktörler

Herhangi bir piezoelektrik malzeme, diğerleri gibi, bileşimi tarafından belirlenen koşullarda kullanıldığında en iyi performansı gösterip bir piezoelektrik malzemeyi sınırlarının ötesinde çalışmaya zorlamak istenmeyen sonuçlara yol açar, bunun sonucunda piezoelektrik malzemenin performansı bozulurup piezoelektrik özelliği kayıp edilmektedir. Bir piezoelektrik malzeme polaritesini kaybederek piezoelektrik sabitlerinin zamanla azalmasına neden olmaktadır. Uzun menzilli piezoelektrik seramiklerde, normal koşullar altında bile zamanla logaritmik polarizasyonun azaldığı keşfedilmiştir (Elvin ve diğ., 2003), (Usta, 2019).

2.7.1. Yaşlanma Süreci

Piezoelektrik kristallerin içerik ve polarite özelliklerinin zamanla kaybolması, yaşlanma etkisi olarak bilinmektedir. Piezoelektrik malzeme normal koşullar altında kullanıldığında bile yaşlanma etkisi görülebilmektedir ve bu oldukça yaygındır. Piezoelektrik malzemeyi yapmak için kullanılan seramik malzemenin yanı sıra onu oluşturmak için kullanılan üretim prosedürleri ile, piezoelektrik malzemelere sınırlarının ötesinde mekanik, elektriksel ve optik kuvvetler uyguladığında, yaşlanmalarını hızlandırabilmektedir (APC International Ltd, 2006), (Usta, 2019).

2.7.2. Mekanik Etki

Piezoelektrik malzemelerdeki mekanik stres ve basınç miktarlarının sınırları olduğu bilinmektedir. Bir piezoelektrik malzemenin yapıldığı seramik türü, polarize piezoelektrik malzemeler, varsayılan sınırlarının ötesinde çekme ve sıkıştırma kuvvetlerine maruz kaldıklarında polaritelerini kısmen veya tamamen kaybettiğinden, ona uygulanması gereken gerilim ve stres miktarını belirlemektedir. Sonuç olarak, piezoelektrik malzemeler için çekme ve basınç dayanım limitleri birbirinden farklıdır (APC International Ltd, 2006), (Usta, 2019).

2.7.3. Elektriksel Etki

Piezoelektrik malzemenin polarizasyon hattının tersi yönünde olduğunda depolarizasyonu sona eren bir piezoelektrik malzemeye uygulanan güçlü elektrik alanı,

piezoelektrik malzemenin polarizasyonunda bozulmalara neden olmaktadır. Ters elektrik alanının etkisi sıcaklık, ters elektrik alanının uygulanma süresi ve piezoelektrik malzemenin maruz kaldığı diğer koşullarla orantılıdır. Öte yandan, 200-500V/mm veya daha yüksek elektrik alanları önemli bozulmaya neden olmaktadır (APC International Ltd, 2006), (Usta, 2019).

2.7.4. Termal Etki

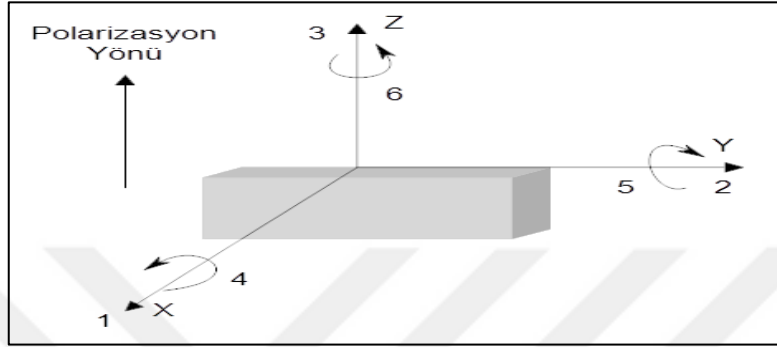
Piezoelektrik malzemelerin kalitesi, artan çalışma sıcaklığı ile ters orantılı olarak düşmektedir. Bir piezoelektrik malzeme, malzemenin belirli bir sıcaklığına, yani curie sıcaklığına ısıtılırsa, içindeki bölgeler kaybolur, bu da piezoelektrik malzeme içindeki bölgelerin kaybolması nedeniyle depolarizasyona yol açmaktadır. Bu nedenle piezoelektrik malzemenin sıcaklığı curie sıcaklığı olan maksimum sıcaklıktan daha az olmalıdır. Piezoelektrik kristaller için, kullanım için maksimum sıcaklık olarak curie sıcaklığının yarısı önerilmektedir. Bir piezoelektrik gruptaki bir piezoelektrik malzeme, seri bir gerilim üretmeye bağlanırsa, curie sıcaklığının kritik değerini aşarsa, diğer malzemeler depolarize olacak ve olumsuz bir etkiye sahip olacaktır.

Tüm bu incelemeler sonucunda şu sonuçlara varabilmektedir: sınırlı bir süre için piezoelektrik malzemelerin piezo etki süresi geçerlidir. Sonuç olarak geliştirme öncesi piezoelektrik malzeme seçimini, çalışma koşullarını ve teknik bilgileri doğru belirlememiz gerekmektedir. Piezoelektrik malzeme ne kadar kararlı olursa, çalışma koşullarında değişim ve çözünme süreleri o kadar uzun olmaktadır (APC International Ltd, 2006), (Usta, 2019).

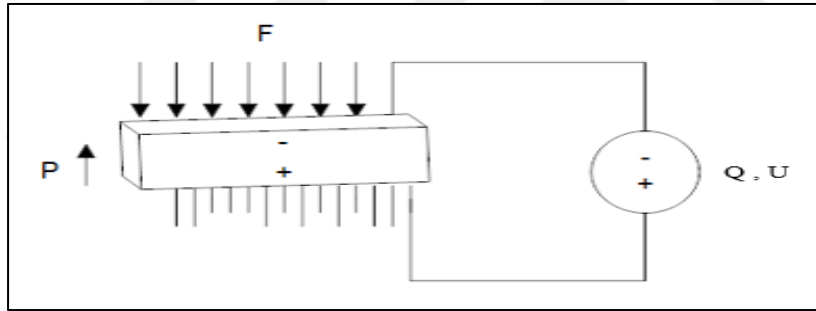
2.8. Piezoelektrik Malzemelerin Matematiği

Piezoelektrik malzemeler genellikle farklı özelliklere sahiptir ve bu özellikler polarizasyon yönüne bağlıdır. Hesaplamaları yapmak için malzemeye uygulanan elektriksel veya mekanik darbenin yönünü bilmek önemlidir ve piezoelektrik özellikleri ifade etmek için sabit bir eksen kullanılmalıdır. Şekil 2.6' da, üç eksenin (X-Y-Z) sayılarla (1-2-3) ve oluşabilecek eksen kaymasının sayılarla (4-5-6) temsil edildiği piezoelektrik malzemenin polarizasyon yönünü gösterilmektedir, sırasıyla ve eksen 3, bir piezoelektrik malzemedeki polarizasyon yönünü temsil edilmektedir. Düşük elektrik alanlarında ve düşük mekanik stres seviyelerinde piezoelektrik malzemelerin doğrusal olduğu

gösterilmiştir. Bununla birlikte, yüksek bir elektrik alanı veya yüksek mekanik stres seviyesi altında çalıştırılırsa önemli doğrusal olmayan görünebilmektedir. Piezoelektrik jeneratör Şekil 2.7' de gösterilmiştir. Eksen 3 olan polarizasyon eksenini yönünde, bir piezoelektrik malzemeye uygulanan mekanik basınca yanıt olarak bir gerilim üretilmektedir (Moheimani ve Fleming, 2006), (Tan ve Panda, 2007).



Şekil 2.6. Piezoelektrik malzemenin şematik diyagramı



Şekil 2.7. Piezoelektrik jeneratör paralel mod da çalışması

Piezoelektrik malzemeler için elektromekanik denklemler aşağıda verilmiştir (Usta, 2019), (Moheimani ve Fleming, 2006):

$$x = S^D \cdot T + g \cdot D \quad (2.1)$$

$$E = g \cdot T + \beta^x \cdot D \quad (2.2)$$

Burada,

x : Stresin etkisi yada zorlanma etkisi

D: Elektrik yer değiştirmesi

E: Elektrik alanı

S: Elastik uyumluluk

g: Piezoelektrik gerilim sabiti

β : Dielektrik duyarlılığı

T: Mekanik streştir.

$$g = \frac{d}{\varepsilon} \quad (2.3)$$

$$g = \frac{d}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} \quad (2.4)$$

$$d = g \cdot \varepsilon_0 \varepsilon_r \quad (2.5)$$

d: Piezoelektrik yük sabiti

ε : Dielektrik sabiti

ε_0 : Vakum dielektrik sabiti

ε_r : Malzemenin bağıl dielektrik sabiti

Aşağıdaki denklem, uygulanan yük tarafından üretilen elektrik alanı ile mekanik gerilim arasındaki ilişkiyi temsil edilmektedir:

$$E = g T \quad (2.6)$$

Piezoelektrik malzemelerin açık devre gerilimi aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmaktadır:

$$U = E t \quad (2.7)$$

U: Piezoelektrik malzemelerin açık devre gerilimi

t: Piezoseramik kalınlığı

Denklem 2.6'yı denklem 2.7'ye koyarak, denklem 2.8'i bulunmaktadır

$$U = g T t \quad (2.8)$$

$$F = T A \quad (2.9)$$

Denklem 2.8, Kuvveti altında yeniden yazılabilmektedir.

$$U = \frac{g F t}{A} \quad (2.10)$$

A: Piezoelektrik elemanın yüzey alanı

F: Uygulanan kuvvet

2.8 denkleminde T denklemini yazılabilmektedir:

$$T = \frac{U}{g t} \quad (2.11)$$

Aşağıdaki denklem, belirli bir yük altında bir piezoelektrik malzemeden elde edilebilecek elektrik yükünü temsil edilmektedir:

$$Q = d F \quad (2.12)$$

Denklem 2.9'u denklem 2.12'ye koyarak, denklem 2.13'ü bulunmaktadır

$$Q = d T A \quad (2.13)$$

Q : Piezoelektrik seramikte üretilen elektrik yükü

Denklem 2.11'i denklem 2.13'e koyarak, denklem 2.14'ü bulunmaktadır

$$Q = d \frac{U}{g t} A \quad (2.14)$$

Denklem 2.4'ü denklem 2.14'e koyarak, denklem 2.15'i bulunmaktadır

$$Q = \frac{U \varepsilon_0 \varepsilon_r A}{t} \quad (2.15)$$

2.15 denkleminden 2.16 denklemi yazabilmektedir

$$\frac{Q}{A} = \frac{U \varepsilon_0 \varepsilon_r}{t} \quad (2.16)$$

Piezoelektrik malzemelerin kapasitansı (C) aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanabilmektedir.

$$\frac{Q}{U} = C = \frac{A \varepsilon_0 \varepsilon_r}{t} \quad (2.17)$$

2.17 denkleminden 2.18 denklemi yazabilmektedir

$$U = \frac{Q}{C} \quad (2.18)$$

Yukarıdaki 2.17 denkleminden, piezoelektrik malzemelerin yüzeyinin düşük frekanslarda paralel bir kapasitör gibi davrandığını gösterilmektedir. Bu nedenle elde edilebilecek çıkış gücü denklem 2.19' da verilmiştir.

$$P = \frac{1}{2} C U^2 f \quad (2.19)$$

f: Titreşimin frekansıdır

Denklem 2.10'u ve denklem 2.17'yi denklem 2.19'a koyarak, 2.20 denklemi bulunmaktadır

$$P = \frac{1}{2} (d g) F^2 \frac{t}{A} f \quad (2.20)$$

Yukarıda türetilen ilişki, A sabit alanlı ve t kalınlıklı, belirli bir piezoelektrik malzeme için, üretilen elektrik gücü P'nin, F kuvveti altında piezoelektrik malzeme yük sabiti d ve gerilim sabiti g'ye bağlı olduğunu gösterilmektedir. Rezonanstan uzak, düşük frekanslarda yüksek performans elde etmek için (d ve g değerleri) yüksek olan piezoelektrik malzeme seçilmelidir.

2.9. Piezoelektrik Malzemelerin Elektrik Modeli

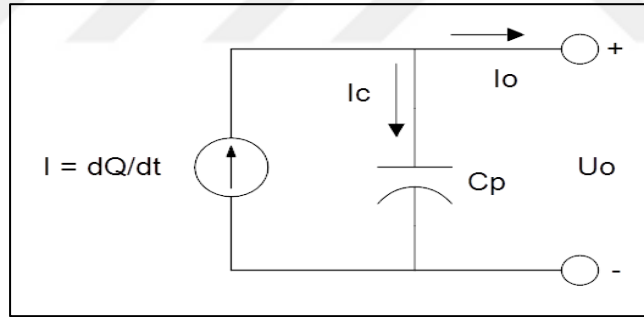
Piezoelektrik dönüştürücünün mekanik stresine tepki olarak bir elektrik yükü üretilmektedir. Sonuç olarak, bir piezoelektrik dönüştürücü tarafından oluşturulan yükü kullanarak, basitçe bir akım kaynağı oluşturabilmektedir. Bir devrenin belirli bir bölümünde saniyede hareket eden elektrik yükünün (coulomb cinsinden) miktarı, elektrik akımı (amper cinsinden) olarak bilinmektedir. Piezoelektrik dönüştürücü tarafından oluşturulan yükün statik olmadığını anlamak önemlidir. Piezoelektrik bir elektrik devresi ile temas ederse, yük hareket eder ve etkin hale gelmektedir. Bu, piezoelektrik cihazı temsil etmek için akım değeri yükün türevine eşit olan bir akım kaynağı kullanabileceğimiz anlamına gelmektedir (Keim, 2018), (Piezoelectric Transducer, 2020).

$$I = \frac{dQ}{dt} \quad (2.21)$$

t : Zaman

I : Elektrik akımı

Şekil 2.8' de piezoelektrik malzemelerin elektrik modelini gösterilmektedir.



Şekil 2.8. Piezoelektrik malzemelerin elektrik modeli

Şekil 2.8' de elektrik akımını hesaplamak için aşağıdaki denklemi kullanabilmektedir:

$$I = I_C + I_O \quad (2.22)$$

I_O : Çıkış akımı

I_C : Kapasitör akımı

Şekil 2.8' de çıkış gerilimini hesaplamak için kapasitif bir devrede gerilim ve akım arasındaki ilişkiden yararlanabilmektedir.

$$U_O = \frac{1}{C_p} \int I dt \quad (2.23)$$

C: Kapasitans

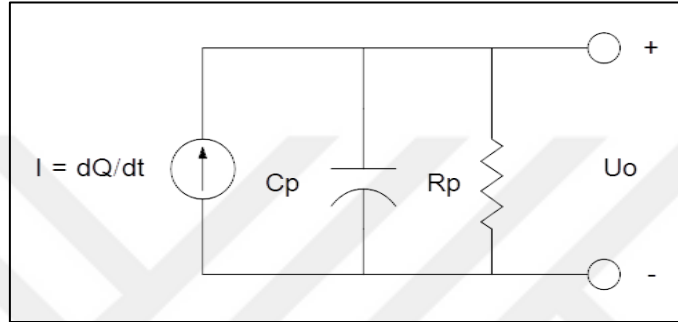
U_0 = Çıkış gerilimi = Kapsitörün gerilimi

Denklem 2.21'i denklem 2.23'e koyarak, denklem 2.24'ü bulunmaktadır

$$U_0 = \frac{1}{C_p} \int \frac{dQ}{dt} dt = \frac{Q}{C_p} \quad (2.24)$$

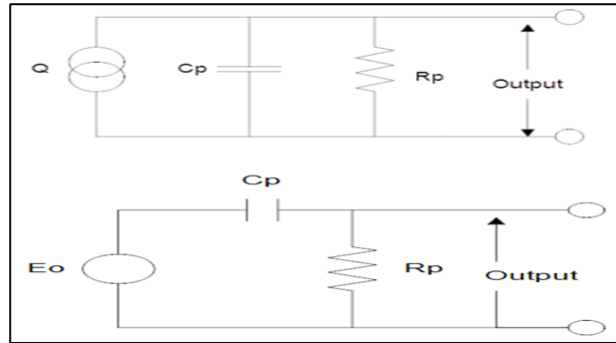
2.24 denklemi ve 2.18 denklemine eşitmektedir

Piezoelektrik işlevselliğin geniş bir tasviri olarak daha gerçekçi olmasını istiyorsak, modele paralel bir direnç eklememiz gerekmektedir:



Şekil 2.9. Dirençli piezoelektrik malzemelerin elektrik modeli

Denklem 2.24' ten aracılığıyla, genlikli bir gerilim kaynağı ile piezonun elektrik devresini temsil edebilmektedir.



Şekil 2.10. Gerilim kaynakla piezoelektrik malzemelerin elektrik modeli

- dF' 'ye eşit bir değere sahip bir yük üretici, denklem 2.12' de olduğu gibi bir kaynak olarak adlandırılmaktadır.
- Yük, kristalin kapasitansı C_p ve kaçak direnci R_p üzerinden çarjı geçirilerek oluşturulmaktadır.
- $E_0 = U_0 = Q/C_p = dF/C_p$ gerilim olan eşdeğer bir gerilim kaynağı, şarj jeneratörü yerine kullanılabilir.

3. TÜRBİNLER

3.1. Rüzgar Enerjisi

1891'de Danimarka'da aerodinamikçi olan Paul La Coeur tarafından bir rüzgar türbini, rüzgar enerjisinden elektrik enerjisi üretmek için tasarlanmıştır. 80'li yılların başında sanayi ve teknolojinin gelişmesi sonucunda, o dönemde elektrik enerjisinin başka yöntemlerle üretilmesi pahalı olduğu için 55 kW kapasiteli rüzgar türbinleri üretilmeye başlanmıştır. Avrupa'daki Risoe Ulusal Laboratuvarı'nın yardımıyla ve rüzgar türbini endüstrisinin gelişmesiyle birlikte Avrupa Rüzgar Atlası oluşturulmuştur ve bunun sonucunda elektrik üretimi daha uygun maliyetli hale gelmiştir (Usta, 2019), (Nurbay ve Çınar, 2005).

3.2. Rüzgar Türbinleri

Bir yenilenebilir enerji üreticisi rüzgar türbinleridir. Kanatları sayesinde rüzgarın kinetik enerjisi mekanik enerjiye dönüştürülmektedir. Güç aktarma organı bu mekanik enerjiyi generatöre gönderip elektrik enerjisine dönüştürülmektedir (Işık ve Ünal, 2020).

Geçmişten günümüze birçok model ve tasarım denenmiş ve cihazlarında kullanılan türbinler çok çeşitli şekil ve boyutlarda geliştirilmiştir. Bugüne kadar çeşitli özellik ve modellerde inşa edilen bu tip rüzgar türbinlerinden bazıları, elektrik üretimi için geliştirilmiş ve ticari kullanıma sunulmuş bazıları tasarım aşamasında kalmıştır (Nurbay ve Çınar, 2005), (Köse ve Özgören, 2005).

Rüzgar türbinlerini dönme eksenini kullanarak sınıflandırılır. Bunlar:

- 1- Yatay Rüzgar Türbinleri.
- 2- Dikey Rüzgar Türbinleri.
- 3- Eğik Rüzgar Türbinleri.

3.2.1. Yatay Rüzgar Türbinleri

Yatay rüzgar türbinlerinde kanatlar rüzgarın yönü dik ve dönüş eksenini rüzgarın yönü paralel olarak ayarlanmaktadır. Mil şaftında daha az kanat bulunan bu türbinlerde rotor daha hızlı döner ve bu tür türbinlerin verimi yüzde 45 olarak tahmin edilmektedir. Bu rüzgar türbinleri, yer seviyesinden 20-30 metre yüksekte bulunmalıdır. Kanat uç hız oranı

(λ), kanatlara çarpan rüzgarın hızının bağlı kanatların uç hızına bölünmesiyle hesaplanmaktadır;

$\lambda = 1-5$ (çok kanatlı rotor).

$\lambda = 6-8$ (üç kanatlı rotor).

$\lambda = 9-15$ (iki kanatlı rotor).

$\lambda < 15$ (tek kanatlı rotor kullanılır).

Yatay rüzgar türbinlerinin, rotor kanat sayısına, ön veya arka rüzgar yönüne sahip olanlar da dahil olmak üzere çeşitli konfigürasyonları mevcuttur (Usta, 2019), (Nurbay ve Çınar,2005).

3.2.1.1. Ön Rüzgar Türbinleri

En sık kullanılan tip olan bu türbinlerde rotor şaftın eksen rüzgarın yönü diktir. Bu türbinlerin daha önemli yarar, kuleye yaklaştıkça rüzgar döndüğü için kulenin arkasındaki rüzgar gölgeleme etkisinin minimum olmasıdır. Kule yuvarlak veya düz olduğu için, türbin kanatlarının generatöre ilettiği güç, kanat kulenin önünden her geçtiğinde azalmaktadır. Kanatlar rüzgar bükülmesi nedeniyle büküleceğinden, kanatlar ve kule arasında önemli bir boşluk bırakılarak hafif ve sağlam olmalıdırlar. Rotor şaftını rüzgara karşı hareket ettirmek için rüzgara karşı makinelerde rüzgar kanadı açısı değiştirme mekanizması gerekmektedir (Usta, 2019).

3.2.1.2. Arka Rüzgar Türbinleri

Bu makinelerin rotorları kulenin arkasına yerleştirilmiştir. Rüzgara geri dönmek için rüzgar kanatlarının açısını değiştirecek bir mekanizmaya ihtiyaç duymadıkları için önemli bir faydaları vardır. Nacelle bölümü rüzgardan bağımsız olarak kanatların arkasındaki rüzgarı takip edecektir. Eğer nacelle bölümü ve rotor eksen doğru şekilde yapılandırılmışsa, kanatlar esnek cam elyafı veya kompozit malzemeden oluştuğu için hafiftirlerdir. Makinenin güç dinamikleri açısından, bu özellik önemli bir fayda olarak gösterebilmektedir. Sonuç olarak, bu makinelerde kule rüzgarı ve gölgeleme yükü, ön rüzgar türbinlerine göre daha düşüktür. Kanattan geçerken rüzgârın şiddeti değişimleri ise rüzgarı önden alan türbinlerden daha fazlası türbine hasar veriyor gibi görünmektedir (Usta, 2019), (Nurbay ve Çınar, 2005).

3.2.1.3. Tek Kanatlı Türbinler

Tek kanatlı rüzgar türbinleri kanat sayısının az olması nedeniyle yüksek hızlarda döner ve bu hızda dönen şaftın momenti ve kullanılan makinenin yükü azalmaktadır. Kanat üzerindeki mekanik stresi azaltan kanat mekanizmasının hareketinin kanat için sürtünmesiz olması için rotor miline bağlı kanadın bir mile sabitlenmesi ve bir karşı ağırlık ile dengelenmesi gerekmektedir. Tek kanatlı rotorlarda aerodinamik dengeleme hatalarını ve mekanizmanın kontrol altındaki hareketini idare etmek için, rotor kontrol şaftı iyi yapması gerekmektedir. MBB şirket tarafından, Almanya Wilhelmshaven yakınlarında çalışan, her biri 630kW gücünde ve 56 m rotor çapına sahip üç tip rüzgar türbini tasarlamıştır (Nurbay ve Çınar, 2005). Yaklaşık 120 m/s'lik türbin uç hızının bir sonucu olarak rotorun aerodinamik gürültü seviyesinin yüksek olmasının yanı sıra aerodinamik dengesizlik tasarım kusurları olarak sayılabilmektedir. Tek kanatlı rüzgar türbinlerini üç kanatlı rüzgar türbinleri ile karşılaştırıldığında, tek kanatlı rüzgar türbinlerinin kanat uç hızının 3 kanatlı rüzgar türbinlerinin 2 katı olduğunu görülmektedir (Usta, 2019). Şekil 3.1' de tek kanatlı bir rüzgar türbini gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Tek kanatlı bir rüzgar türbinini

3.2.1.4. İki Kanatlı Rüzgar Türbinleri

Bu tip iki kanatlı türbin, üç kanatlı türbin tipine kıyasla şaft maliyetini azaltmak için tasarlanmıştır. Birçok ülke 10 metre ile 100 metre arasında değişen çaplarda rüzgar türbinleri inşa etmiştir. Bu ticari rüzgar türbinlerinden yalnızca birkaçı prototipten seri üretime başarıyla geçmiştir. Rotor milinin titreşimini azaltmak için rotora ek bir dişli ve şaft sistemi eklenmiştir. Bu sistem, şaft miline de iki şaft kanatlarının her birine dik olarak kurulmaktadır. Başlıca avantajı, üç kanatlı bir rotora kıyasla daha yüksek kanat ucu

hızlarıdır. Bu rüzgar türbinlerinin bir dezavantajı, çok fazla gürültü üretmeleri ve düşük rüzgar hızlarında (3 m/s) çalışmasıdır. Günümüzde piyasada iki kanatlı rotorlu türbinlerden çok az olduğu ve Pazar analizi yapıldığında iki kanatlı rotora doğru bir trend olmadığını görülmektedir (Nurbay ve Çınar, 2005).

3.2.1.5. Üç Kanatlı Rüzgar Türbinleri

Dünyanın her yerinde üç kanatlı türbinler yaygın olarak kullanılmaktadır. Üç kanat kullanmanın temel avantajı, torkun daha eşit dağılmış olmasıdır. Türbin konstrüksiyonunda depolanan yükler nedeniyle salınan atalet momenti olmadığından, göbek içinde maliyetli titreşim önleyici elemanlara gerek yoktur. Düşük gürültü seviyesi ve düzgün dönmeleri ve estetik olarak gözü rahatsız etmemesi önemli avantajlarıdır, çünkü kanat uç hızı 70 m/s'nin altında olduğundan halk tarafından memnuniyetle karşılanmıştır (Nurbay ve Çınar, 2005). Şekil 3.2' de üç kanatlı bir rüzgar türbinini gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Üç kanatlı rüzgar türbinini

3.2.1.6. Çok Kanatlı Türbinleri

İlk gelişmemiş rüzgar türbinleri (yel değirmenleri) çok kanatlı rüzgar türbinleridir. Bu süreçteki mevcut ihtiyacı karşılamak için geçmişten günümüze tarımsal su pompalamasında kullanılan bu rüzgar türbinleri çok sayıda kanat şeklinde inşa edilmiştir. Çok kanatlı rüzgar türbinleri düşük hızlarda çalışma mümkündür. Pervanenin ortasından uçlarına doğru hareket ettikçe türbin kanatlarının genişliği genişlerdir. Hava hızı vektörünün türbin düzlemi tarafından her zaman dikey olarak alınmasını sağlamak için

yön verme kuyruğu eklenmektedir (Usta, 2019). Şekil 3.3’ te çok kanatlı rüzgar türbinini gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Çok kanatlı rüzgar türbinini

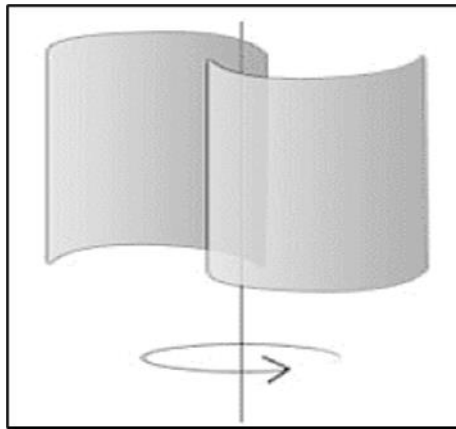
3.2.2. Dikey Rüzgar Türbinleri

Yatay eksen, dönme eksenleri rüzgarın yönüne dikey olan bu türbinlerin kanatlarını oluşturmak için de kullanılmaktadır. Dikey dönen eksenli rüzgar türbinleri, rüzgarı herhangi bir yönden yakalayabilmektedir. Rüzgar türbinler tarafından sürüklenir veya kaldırılmaktadır. Geçişler kararsızdır ve ilk hareket süreci zordur. Bu türbinler yüzde 35 verimlilik derecesine sahiptir. Dikey eksenli türbinlerde, generatör ve vites kutusu zeminde konumlanabileceğinden kule veya nasele gerektirmezdir. Sonuç olarak, düşük rüzgarlı ortamlarda çalışabilirler ve yatay mekanik dişli kutusu gerektirmezlerdir. Düşük rüzgar koşullarında çalışmak ve çiftlikler için su pompalamak için yapılmıştır. Bıçak sayısı arttıkça oluşturulacak malzemenin ağırlığı da artacaktır. Sonuç olarak, ağırlığı nedeniyle yüksek rüzgar hızlarında verimsizdir. 5 metre çapında kanatlara sahip olan ve rotor miline bağlı olan türbin, yaklaşık 0.5 kW elektrik üretmektedir. Bu türbinleri kendisine bağlamak için çelik halatlar ve rotor mili zemine sabitlenmiştir (Nurbay ve Çınar, 2005), (Usta, 2019).

3.2.2.1. Savonius Rüzgar Türbinleri

Finli bir mühendis olan Sigurd J. Savonius, 1925'te Savonius rüzgar türbinini icat edilmiştir. Bu türbinlerdeki kanatlar, iki yatay disk arasında simetrik olarak kaydırılmış iki silindirden oluşmaktadır. Rüzgar, çarkı oluşturan silindirin dış tarafında negatif bir momente ve belirli bir hızda estiğinde iç tarafında pozitif bir momente neden olmaktadır.

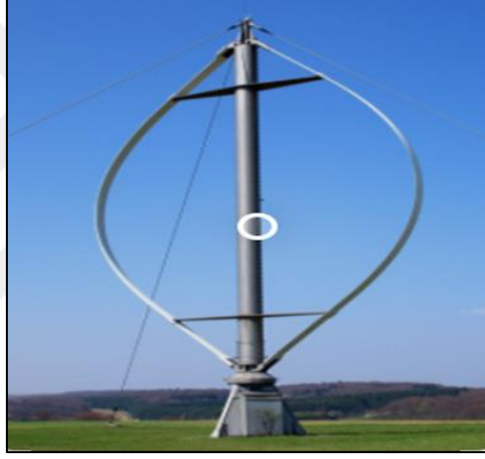
Rüzgar, çarkı oluşturan silindirin dış tarafında negatif bir momente ve belirli bir hızda estiğinde iç tarafında pozitif bir momente neden olmaktadır. Eğer pozitif moment, negatif momenti aşarsa, pozitif moment yönünde dönüş meydana gelmektedir (Ushiyama ve Nagai, 1988). Diğer dikey eksenli rüzgar türbinleri ile karşılaştırıldığında, Savonius rüzgar türbinleri, ilk hareketi kendi başına başlatma yeteneği, rüzgar yönünden bağımsızlık, düşük rüzgar hızlarında iyi kalkış ve sürüş, yapım kolaylığı ve düşük tedarik maliyetleri gibi birçok iyi avantajı vardır. Savonius Rüzgar türbinlerinin ilk uygulama alanları, havalandırma ve su pompaları ile sınırlanmıştır. Çok sayıda avantajına rağmen savonius rüzgar türbini, zayıf aerodinamik performansı nedeniyle kullanılmamaktadır. Son savonius rüzgar türbini araştırmaları, aerodinamik performansı artırmaya odaklanmıştır (Newman, 1974; Modi ve Fernando, 1989). Bu tekerleğin performansı hakkında Aldoss ve Najjar, "sallanan tekerlek " deneysel bir araştırma yapmışlardır. Savonius türbini, geliştirme çalışmalarında pervane kanatlarının mükemmel bir açıyla rüzgarın arkasına ve rüzgara doğru dönmesine izin vererek rüzgar türbini performansını artırılmıştır (Aldoss ve Najjar, 1985). Reupke ve Probert, savonius rüzgar türbininin operasyonel verimliliğini artırmak için türbin kanatlarının bükülmüş kısımlarını bir dizi menteşeli kanatla değiştirilmiştir. Rüzgara doğru hareket ederken, kanatlar rüzgar basıncı nedeniyle otomatik olarak genişleyerek akış direncinin azalmasına neden olmaktadır. Kanatlar başlangıç konumuna ulaştığında otomatik olarak kapandıklarını ve düzeltilmiş kanatlı çarkların geleneksel savonius rüzgar türbinlerinden çok düşük uç hız oranlarında daha büyük momentler ürettiğini keşfetmişlerdir (Reupke ve Probert, 1991). Şekil 3.4' te savonius rüzgar türbinleri gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Savonius rüzgar türbinleri

3.2.2.2. Darrieus Rüzgar Türbinleri

Fransız mühendis George J.M. Darrieus, darrieus rüzgar türbinini keşfet edilmiştir. Darrieus bu fikri 1931'de ortaya atmıştır. 1970'lerde ve 1980'lerde Amerika Birleşik devletleri ve Kanada'da darrieus türbin tasarımları üzerinde önemli araştırmalar yapılmıştır (Modi ve Fernando, 1989). Geometrik tabanlı aerodinamik hesaplama tekniği, bu türbinler için kanat düzenini belirlemek için son derece güçlüdür ve olağanüstü performans ile sonuçlanmaktadır. Kanatların rotor milinden uçlara kadar küçük eğimi sayesinde kanatlar üzerindeki rüzgar bükme ve çekme yükleri en aza indirilmektedir. Türbin tipik olarak iki veya üç kanatlı olarak yapılır ve yüksek hızlarda çalışabilmektedir. Harekete başlamak için bir savonius rüzgar türbini veya bir kalkış motoru gerekmektedir (Usta, 2019). Şekil 3.5' te darrieus rüzgar türbinleri gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Darrieus rüzgar türbinleri

3.2.2.3. H-Darrieus Rüzgar Enerji Türbinleri

Dikey eksenli rüzgar türbini tasarımı en önemli tiplerden biridir. Darrieus rüzgar türbininin gelişimi, daha karmaşık bir rüzgar enerjisi türbini türüyle sonuçlanmıştır. Darrieus, rüzgar türbininden iki ana farklı vardır (Nurbay ve Çınar, 2005):

- 1- Oldukça düz bir aerodinamik sahiptir.
- 2- Kanatlarda yunuslama kontrolü kullanılmıştır.

Şekil 3.6' da H-Darrieus rüzgar türbini gösterilmiştir.



Şekil 3.6. H-Darrieus rüzgar türbinleri

3.2.3. Eğik Rüzgar Türbinleri

Hava yönünde düşey ile köşe yapan dönme eksenlerine sahip rüzgar türbinleridir. Bu tür türbinin kanatları dönme eksenine göre bir açıdadır (Usta, 2019).

3.3. Rüzgar Türbini Modelleri Karşılaştırılması

Rüzgar santrali kurulumu sırasındaki mali kayıpları azaltmak için rüzgar koşulları, kurulum bölgesi ve rüzgar türbini özellikleri bilinmesi gerekmektedir. Kanat tiplerine, rüzgarı nasıl aldıklarına ve nerede kullanıldıklarına göre rüzgar türbinleri çeşitli tarzlarda yapılabilmektedir. Tablo 3.1, 3.2 ve 3.3, rüzgar türbinlerini birçok özelliği ve türüne göre karşılaştırmaktadır. Türbinin amacı, bölgedeki rüzgar ve bütçe kısıtlarına göre seçilmesi gereken türbin tipi veya kurulacak türbinin özellikleri bu tablolarda gösterilmektedir (Nurbay ve Çınar, 2005).

Tablo 3.1. Türbinlerin Boyuta Göre Karşılaştırılması (Nurbay ve Çınar, 2005)

Türbin Çeşitleri	Kullanılan Bölge	Bir Türbin Gücü	Üretilen Enerji Kullanacağı Yeri	Pil Gereksinimleri	Bakım Maliyeti	Kurulum Maliyeti
Büyük Rüzgar Türbini	Endüstriyel	50kW-2MW	Enerji Şebekesi	Var olmayan	Mevcut	Pahalı
Küçük Rüzgar Türbini	Kişiyeye özel	50W-20kW	Çiftlik evleri, telekomünikasyon alıcıları, radyo kuleleri, seralar ve acil durum telefonları vb.	Mevcut	Var olmayan	Ucuz

Tablo 3.2. Türbinler Rüzgarı Nasıl Aldıklarına Göre Karşılaştırılması (Nurbay ve Çınar, 2005)

	Yaw Mekanizması Gerekli	Kanat Malzemesinin Yapısı	Kule Üzerine Bir Yük İstikrarı	Türbinde Rüzgar Hasarı
Ön Rüzgar Türbinleri	Mevcut	Sert	Ağır olan	Küçük
Arka Rüzgar Türbinleri	Var olmayan	elastik	Ağır olmayan	Büyük

Tablo 3.3. Kanat Tiplerine Göre Türbin Karşılaştırılması (Nurbay ve Çınar, 2005)

	Yatay Rüzgar Türbinleri				Dikey Rüzgar Tür	
	Tek Kanatlı	İki Kanatlı	Üç Kanatlı	Çok Kanatlı	Savonious	Darrieus
Maliyet	Pahalı	Pahalı	Ucuz	Ucuz	Ucuz	Ucuz
Estetik Görünüm	Kalitesiz	Kalitesiz	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun
Gürültü	Yüksek Gürültü	Yüksek Gürültü	Düşük Gürültü	Az Gürültü	Az Gürültü	Az Gürültü
Çalışma Hızı	Hızlı	Yavaş	Hızlı	Yavaş	Yavaş	Yavaş
Kule ihtiyacı	Mevcut	Mevcut	Mevcut	Mevcut	Var olmayan	Var olmayan
Kullanım Amacı	Elektrik	Elektrik	Elektrik	Düşük Güç Su pompalama	Düşük Güç Su pompalama	Düşük Güç Su pompalama
Bugünün Kullanımı	Var olmayan	Var olmayan	Mevcut	Mevcut	Az Kullanılan	Az Kullanılan
Rotorun Dönmesi İçin Rüzgarı	Kaldırır	Kaldırır	Kaldırır	Kaldırır ve Sürükler	Kaldırır ve Sürükler	Kaldırır ve Sürükler

Yerleşim alanlarında veya insan güvenliği için, rotor miline takılan kanatların yerden en az 3 metre yükseklikte ve 40 metre mesafede olacak şekilde kanat yerleşimi ve kanat modelleri tercih edilmektedir. Rüzgar enerjisi üretim çiftlikleri inşa edilirken her bir rüzgar enerjisi türbinlerinin yerleştirilmesinde en fazla rüzgarı almaları ve diğer türbinlerle örtüşmeyecek ayrıca gölgeden en az etkilenecek şekilde konumlandırılmasına özen gösterilmelidir.

3.4. Rüzgar Enerjisi Matematiği

Bir rüzgar akışından ne kadar güç elde edilebileceğini bulmak için 3.1 denklemi kullanılabilir: (Tan ve Panda, 2007).

$$E = \frac{1}{2} m v^2 \quad (3.1)$$

Burada, E: Joule cinsinden enerji miktarı, m: hava boşluğunun kilogram cinsinden tüm kütlesi, v ise metre/saniye cinsinden anlık rüzgar hızıdır. Tüm hava sahasının kütlesini bulmak için 3.2 denklemi kullanılmaktadır:

$$m = \rho A v \Delta t \quad (3.2)$$

A (m²) rüzgar cephesinin kesit alanına sahip bir rüzgar türbini, rüzgar hızı v (m/s) ve hava yoğunluğu ρ (genellikle 1,25 kg/m³) olan bir türbin 3.3 denklemini ile verilen P_T gücünü üretecektir. Burada P_T watt cinsinden hesaplanmaktadır:

$$P_T = \frac{1}{2} C_P A \rho v^3 \quad (3.3)$$

Burada, C_P : türbin için güç katsayısı olarak tanımlanmaktadır. 3.3 denkleminde görüleceği üzere P_T gücü rüzgar hızının küpü ile orantılıdır ve üretilen enerji üzerinde büyük bir etkiye sahiptir.

3.5. Önceki Çalışmalar

Literatür taranırken amaç, çalışmanın temeline rüzgara dayalı enerji kaynakları eklemektedir. Sürekli artan enerji talebi, mevcut teknolojilerin yüksek maliyeti ve çevreye verilen zararın bir sonucu olarak diğer eğilimler ortaya çıkmaktadır. Yukarıda belirtilen enerji kaynakları iki gruba ayrılabilir: Petrol, doğal gaz ve kömür gibi sınırlı enerji kaynakları kabul edilirken, yenilenebilir enerji kaynakları arasında biokütle, jeotermal, gelgit enerjisi, güneş ve rüzgar enerjisi kabul edilmektedir (Doğanay ve Coşkun, 2017). sınırlı enerji ve yenilenebilir enerji kaynaklarının pozitif ve negatif uygulamaları bilirdiği zaman, sınırlı enerji kaynakların çevreye etkisi, akademik ve piyasa çalışmaları ve yenilenebilir kaynakların kullanırken ülkelerin ekonomisini artar ve olumsuz etkiler yokken yenilenebilir kaynaklara geçiş ihtiyacı bir zorunluluktur (Kılıç ve Aslan, 2017). Piezoelektrik kristaller kullanılarak enerji üretimi üzerine bir çalışmayı da içeren bu çalışmada rüzgara dayalı enerji üretim yöntemleri vurgulanmıştır. Birçok araştırma, piezoelektrik malzemeleri bileşenler veya sensör yapıları olarak kullanmıştır (Glynne-Jones ve diğ., 2004). Onaylandığı gibi (Ju ve Ji, 2018) çalışmalarında

Piezoelektrik, güncel deneylerde, doğruluk gerektiren ayarlarda, uzay çalışmalarında, yüksek basınçta ve mıknatıslı alanlardaki çalışması ve performanstan hiç kaybetmeden elektrik üretiminde deneysel aşamalar den üretime istikrarlı bir şekilde geçmektedir.

İmalat intikal aşamasına kullanılacak ideal modeller ve bunlar karşılaşılabilecek kriterler açıklanan bilimsel geçen araştırmalarda incelenmektedir. İncelemeler sonucunda birçok bilimsel araştırma makalede atıfta bulunulmuştur. Örneğin, piezoseramik bileşenler üzerindeki atomik kuvvet mikroskobu (AFM), nanometre altı çözünürlüğe sahip topografik resimler üretebilmektedir. AFM tekniği, ölçüm ucunun numune yüzey çizgisi boyunca belirli bir yörünge boyunca hareket ettirilmesini içermektedir. Çok küçük bir ölçüm noktası ile maddenin üst yüzü arasındaki var olan güçleri hesaplanmaktadır. Bunu yaptığı zaman, birkaç pikometreye kadar yanal yüzeyin çözünürlük ile topografyası ilgili veri sağlanmaktadır. Yapışma, sertlik ve viskozite gibi diğer numune nitelikleri de bu yöntem kullanılarak belirlenebilmektedir (Büyükköşkin, 2018).

Karar verme durumlarında, bu piezo seramik mesaha tüpleri, büyük hareketlilikleri ve hassasiyetleri nedeniyle diğer sistemlere göre önemli bir avantaja sahiptir. Hareket kabiliyeti esas olarak katı hal etkilerine bağlı olduğundan, birkaç mikrosaniyelik reaksiyon sürelerine sahipken, nispeten kısa bir sürede birkaç pikometreden daha az konum çözünürlüğü elde etmede yüksek bir verimlilik düzeyine vardır. Yer değiştirme için çözünürlük değerleri bazı mikron arasında değişmektedir. Dokunmatik olmayan modda oluşturulan interaktif araştırmalar için plakalar veya diskler gibi piezoseramik malzemeleri ölçerken dinamik hareketli almak için ölçüt konsolunun önünde bir atomik kuvvet mikroskobu konmaktadır (Demir, 2017). AFM nin ucu, bu ölçümlerde ölçüm bölgesinin birkaç nanometre üzerindedir, ancak onu dokunmazdır. Veriler güvenilir olduğu sürece, bu yaklaşım kullanılarak atomik yapıların fotoğrafları bile 3D modeller veya grafik dökümleri olarak oluşturulabilmektedir. DESY'deki (German Electron Synchrotron) XEFL parçacık hızlandırıcısı, parçacıkları hızlandırmak için rezonatörler veya boşluklar adı verilen süper iletken hızlandırma cihazları kullanmaktadır. Lineer çarpıcı bir TESLA (Tera Electron Volt Enerji Süper iletken Lineer Hızlandırıcı) için geliştirilen bu teknik çok küçük bir ışın kesiti ve yüksek foton enerjisi ile bir parçacık kontrolünün üretilmesine izin vermektedir. Dikkate alınması gereken bir diğer faktör de ivme alanındaki kuvvetin her zaman yüksek düzeyinde tutulması gerekmektedir (Türker, 2009).

Çok tabakalı piezoelektrik seramik aktüatörün dış yüzey katmanlarındaki sıcaklık 4 Kelvin civarına ulaştığında hemen çalışmaktadır. Bu sıcaklıklarda piezoelektrik seramik aktüatör yer değiştirmesi oda hararetliğiden daha aşağıdadır (Shan ve diğ., 2015). Bu kriyojenik koşullarda, piezoelektrik kristaller radyasyonlu bir ortamda radyasyona maruz kaldıklarında, piezoelektrik kristaller 20 yıla kadar sürekli olarak kullanılabilir. Bu tür yüksek maliyetli projeler için, uzun süreler boyunca ve sık tekrarlarla tutarlı bir şekilde ölçüm yapabilme yeteneği, sahip olunması gereken bir meziyettir (Taya, 2005), (Topolov ve diğ., 2014).

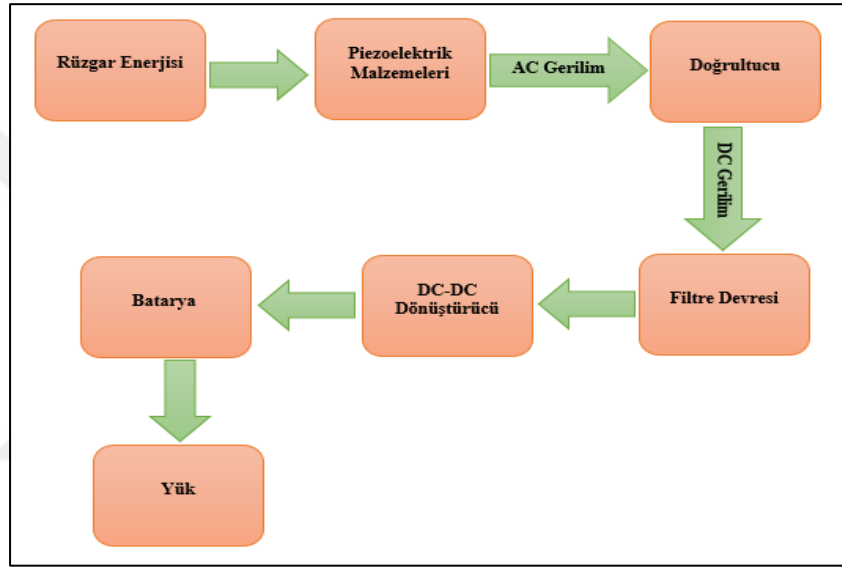
NASA Mars çalışmasında kullanmak üzere yapılmış aletlerde piezoelektrik seramikler kullanarak onu daha sağlam ve işlevsel hale getirmiştir. NASA bir uzay görevine başlamadan önce, piezoseramik hareket kontrol cihazları yüzlerce deneyde kapsamlı bir şekilde değerlendirilmektedir (Tani ve diğ., 1998). Özellikle piezoseramik aktüatörlerin hizmet ömrü incelenmiştir. Bu deneyler sırasında piezoelektrik seramik malzemeler, yüz milyar döngü ile performans deneylerinde kalitelerinden hiç kaybetmeden iyi bir performans sergilediler. Bu performans, cihazın Mars'taki varlığı için uygundur. Çeşitli ölçümler yapacak sensörler, Mars'ın kayaları üzerinde mineralojik ve kimyasal deneylere devam edecektir. Her tabakadan toplanan toz ile farklı kabuk örnekleri toplanacaktır (Newman, 1974), (Patel ve Uzun, 2011). Ancak, parçacık boyutlarına veya yoğunluklarına bağlı olarak bu verileri sınıflandırmak ve ayırmak için “0.9-2.2 kHz” Kapsama alanında değişen frekans genliklerine sahip titreşim düzeyinde kullanılır (Sodano ve diğ., 2004), (Song ve diğ., 2015).

Bu tekniğe ulaşmak için çok tabakalı piezoelektrik seramik titreşim mekanizmaları kullanılmaktadır. Malzeme seçimi ve besleme için gerekli olan vibrasyonları belirli frekans değer aralıklarında üretirlerdir. Seramik kaplaması ve izolasyonu ile çok katmanlı piezoseramik hareket mekanizmaları uygulama ortamında mutlak sıfır ve aşırı vakumlamaya karşı takdire şayan bir şekilde çalışmaktadır. Sentetik malzemeler, belirli koşullar altında çeşitli özelliklere sahiptir ve koşullara bağlı olarak değişimleri nasıl gerçekleştirdikler. Sentetik malzemeler, bu durumda uzun süreler boyunca doğru ve döngüsel ölçümler elde etmek için uygun değildir. Tüm bu araştırma ve deneyler sonucunda piezoseramik malzemeler sentetik malzemelere göre daha fazla tercih edilmektedir (Büyükköşkin, 2018).

4. GÜÇ DÖNÜŞTÜRÜCÜ VE ENERJİ DEPOLANMASI

4.1. Giriş

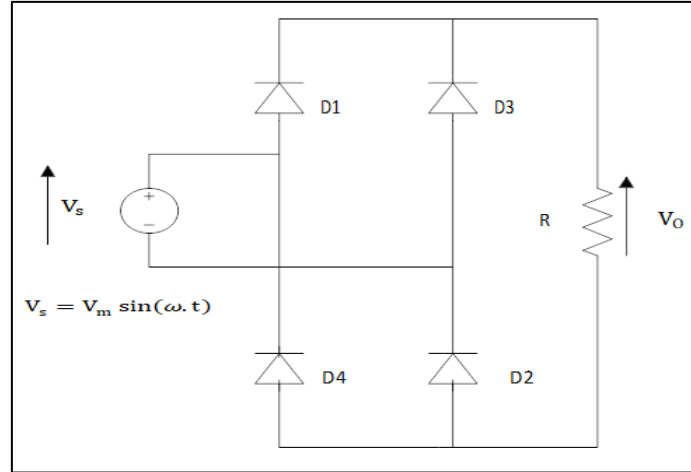
Piezoelektrik malzemeler tarafından üretilen AC gerilim değişken ve kararlı olmayan formdadır. Bu gerilimi depolamak ve kullanmak için DC forma dönüştürmek gerekmektedir. Bu işlem için bir doğrultucu, filtre devresi, batarya ve yük kullanmak gerekmektedir. Önerilen rüzgar tahrikli piezoelektrik enerji hasatı sistemi için enerji akış şeması Şekil 4.1' de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Rüzgar enerjisi hasat sistemi

4.2. Diyot Köprü Doğrultucu

Orta uçlu trafolu tam dalga doğrultucular ve köprü doğrultucular olmak üzere farklı iki tip tek fazlı tam dalga doğrultucu topolojisi vardır. Yükte tam dalga doğrultma sağlamak için iki yarım dalga doğrultucunun çıkışı birleştirmektedir. Şekil 4.2' de tek fazlı tam dalga kontrolsüz köprü doğrultucu devre tasarımını gösterilmektedir. Yarım dalga doğrultucu durumunda negatif yarım döngü için yük gerilimi $V_0(t) = 0$. Tam dalga doğrultucu durumunda döngünün hem pozitif hem de negatif yarısı için yük gerilimi $V_0(t) = V_m \sin(\omega.t)$ biçiminde oluşmaktadır. D_1 ve D_2 diyotları, V_s 'nin pozitif yarı döngüsü sırasında $0'$ dan π' ye iletirken D_3 ve D_4 diyotları, negatif yarı döngü sırasında π' den $2\pi'$ ye iletilmektedir (Iyer, 2018), (Rashid, 2017).



Şekil 4.2. Diyot köprü doğrultucu

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \text{ olursa}$$

$$V_{O\text{-avg}} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} V_m \times \sin(\omega.t) d(\omega.t) \quad (4.1)$$

$$V_{O\text{-avg}} = \frac{2 \times V_m}{\pi} \quad (4.2)$$

$$V_{O\text{-avg}} = 0,636 V_m \quad (4.3)$$

$$I_{O\text{-avg}} = \frac{V_{O\text{-avg}}}{R} \quad (4.4)$$

$$V_{O\text{-rms}} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} V_m^2 \times \sin^2(\omega.t) d(\omega.t)} \quad (4.5)$$

$$V_{O\text{-rms}} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \quad (4.6)$$

$$V_{O\text{-rms}} = 0,707 V_m \quad (4.7)$$

$$I_{O\text{-rms}} = \frac{V_{O\text{-rms}}}{R} \quad (4.8)$$

Burada,

$V_{O\text{-avg}}$: Çıkış gerilimin ortalaması.

$I_{O\text{-avg}}$: Çıkış akımın ortalaması.

V_m : Maksimum gerilim.

R: Yük.

ω : Kaynağın açısal frekansı.

$V_{O\text{-rms}}$: Yük gerilimin ortalama karekök (rms) değeri.

$I_{O\text{-rms}}$: Akımın ortalama karekök (rms) değeri.

T : Periyodik zaman.

4.3. Filtre Devresi

Dirençler, bobinler ve kapasitörler, bir devreyi oluşturan üç temel elektrik bileşenidir. Kondansatör bir filtre görevi görerek dalgalanma frekanslarını ortadan kaldırır ve daha düşük dalgalanma frekansına sahip bir DC gerilim sağlamaktadır. Bir elektrik devresinde bir kondansatör, şarj depolama cihazı görevi görmektedir. Üzerine gerilim uyguladığımızda, elektrik yükünü depolar ve gerektiğinde devreye geri vermektedir (Electrical 4U).

4.4. DC-DC Dönüştürücü

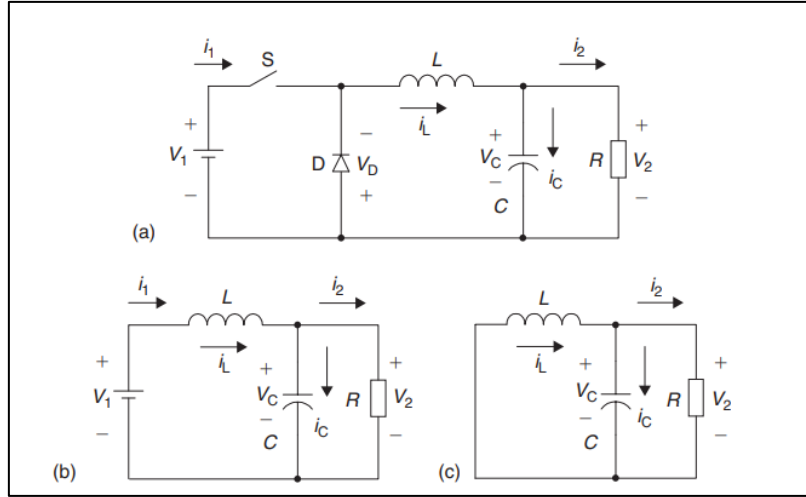
Güç DC/DC dönüştürücüleri için birçok farklı topoloji vardır ve buna karşılık gelen dönüştürme tekniği sıcak bir çalışma konusudur. Bitmemiş araştırmalara göre, 500'den fazla farklı güç DC/DC dönüştürücü topolojisi vardır. Buck dönüştürücüler, Boost dönüştürücüler ve Buck-Boost dönüştürücüler, oluşturulmuş üç temel DC/DC topolojisidir. Tek bir bölgede çalışan kıyıcılar türetilirlerdir. Örneğin Buck dönüştürücüler, A tipi kıyıcılardan geliştirilmiştir. Bu dönüştürücülerin iki büyük kusuru vardır: giriş-çıkış bağlantısı ve çok önemli çıkış gerilimi dalgalanmasıdır (Luo ve diğ, 2010).

4.4.1. Düşüren Dönüştürücü

Bir düşüren DC/DC dönüştürücü, giriş geriliminden daha düşük bir de çıkış gerilimi üretebilmektedir. Birinci bölgede işlev görmektedir. Şekil 4.3' te devre şemasının yanı sıra açma ve kapama eşdeğer devresini göstermektedir (Luo ve diğ, 2010). Çıkış gerilimi (V_2) hesaplama formülü aşağıdaki gibidir:

$$V_2 = \frac{t_{on}}{T} V_1 = k V_1 \quad (4.9)$$

Burada T, tekrar eden periyottur ($T = 1/f$), f, frekansıdır, t_{on} , açma zamanı, k, doluluk oranı ($k = \frac{t_{on}}{T}$) ve V_1 , giriş gerilimidir.



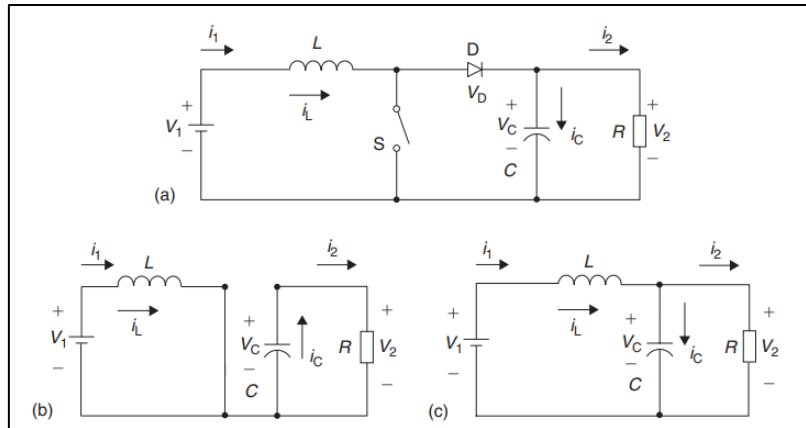
Şekil 4.3. Düşüren dönüştürücü: (a) Devre şeması, (b) Açma eşdeğer devresi (c) Kapama eşdeğer devresi

4.4.2. Yükselten Dönüştürücü

Bir yükseltici DC/DC dönüştürücü, giriş geriliminden daha büyük bir de çıkış gerilimi üretebilmektedir. İkinci kadranda işlev görmektedir. Bunu oluşturmak için Quadrant II kıyıcı kullanılabilir. Şekil 4.4' te devre şemasının yanı sıra açma ve kapama eşdeğer devresini göstermektedir (Luo ve diğ, 2010). Çıkış gerilimi (V_2) hesaplama formülü aşağıdaki gibidir:

$$V_2 = \frac{T}{T-t_{on}} V_1 = \frac{1}{1-k} V_1 \quad (4.10)$$

Burada T , tekrar eden periyottur ($T = 1/f$), f , frekansıdır, t_{on} , açma zamanı , k , doluluk oranı ($k = \frac{t_{on}}{T}$) ve V_1 , giriş gerilimidir.



Şekil 4.4. Yükselten dönüştürücü: (a) Devre şeması, (b) Açma eşdeğer devresi (c) Kapama eşdeğer devresi

Şekil 4.4'ten, anahtar kapalı moddayken, bobin sağ tarafı toprağa bağlanmaktadır, ayrıca Şekil 4.4(b)'daki ağ ile sonuçlanmaktadır. Bu alt aralık için bobin gerilimi ve kapasitör akımı şu şekilde verilmektedir (Erickson ve diğ, 2007):

$$V_1 = v_L \quad (4.11)$$

$$i_C = -\frac{V_2}{R} \quad (4.12)$$

Anahtar açık moddayken, bobin çıkışa bağlanmaktadır. Şekil 4.4(c)'deki devreye gösterdiği gibidir. Bobin gerilimi ve kapasitör akımı formülü aşağıdaki gibidir:

$$v_L = V_1 - V_2 \quad (4.13)$$

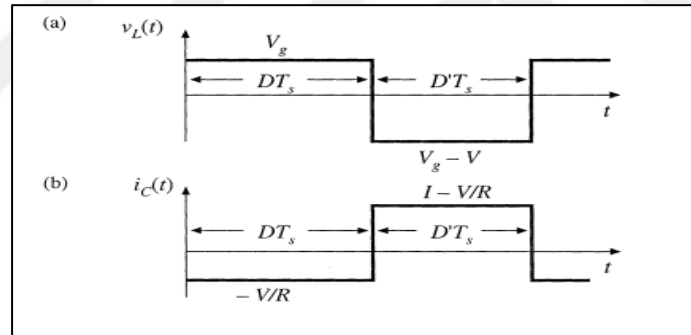
$$i_C = i_L - \frac{V_2}{R} \quad (4.14)$$

Eğer, $V_2 \approx V$, $i_L \approx I$ ve $V_1 \approx V_g$ olursa denklemleri (4.13 ve 4.14) yeniden yazabiliriz:

$$v_L = V_g - V \quad (4.15)$$

$$i_C = I - \frac{V}{R} \quad (4.16)$$

(4.11, 4.12) ve (4.15,4.16) denklemleri, Şekil 4.5' teki bobin gerilimi ve kapasitör akımı dalga formlarını çizmek için kullanılmaktadır.

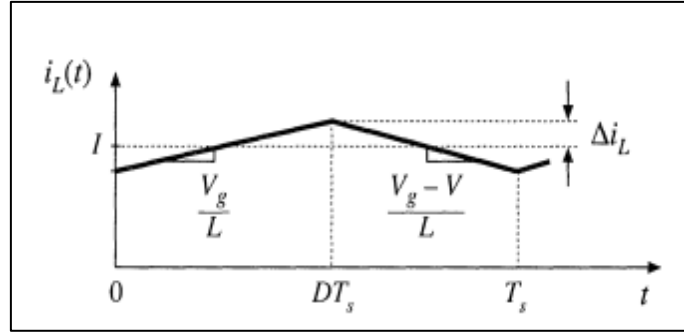


Şekil 4.5. Yükselten dönüştürücü gerilimi ve akım dalga biçimleri

Bobin akımı $i_L(t)$ dalga biçimini çiziniz ve bobin akımı dalgalanması Δi_L için bir ifade elde edilmektedir. Bobin gerilimi dalga formu $v_L(t)$ Şekil 4.5'te zaten bulunduğudur, bu nedenle bobin akımı dalga formunu doğrudan çizebiliriz. İlk alt aralık sırasında, anahtar Şekil 4.4 (b)'de gibi kapalı moddayken, bobin akımının eğimi ile verilmektedir (Erickson ve diğ, 2007):

$$\frac{di_L(t)}{dt} = \frac{v_L(t)}{L} = \frac{V_g}{L} \quad (4.17)$$

Aynı şekilde, anahtar açık moddayken Şekil 4.4 (c)'de gibi, bobin akımı dalga formunun eğimi verilmektedir:



Şekil 4.6. Yükselten dönüştürücü bobin akımı dalga formu $i_L(t)$

$$\frac{di_L(t)}{dt} = \frac{v_L(t)}{L} = \frac{V_g - V}{L} \quad (4.18)$$

Burada,

v_L : Bobin gerilimi

i_C : Kapasitör akımı

R : Yük

i_L : Bobin akımı

L : Bobin

V_1 : Gerilim kaynağı

V_2 : Gerilim yükü

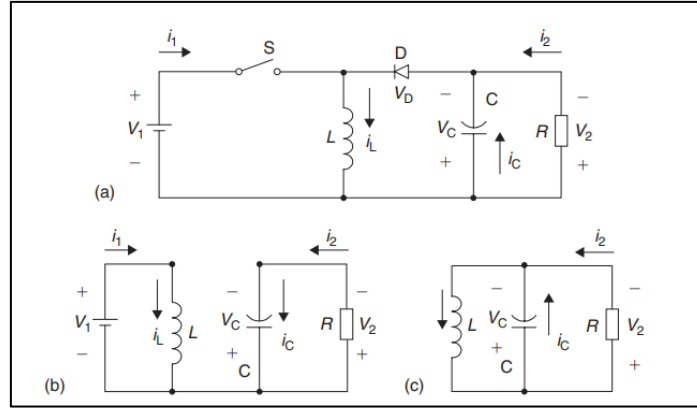
4.4.3. Düşüren - Yükselten Dönüştürücü

Bir aşağı/yukarı DC/DC dönüştürücü, Düşüren-Yükselten dönüştürücüdür. Üçüncü kadranda işlev görmektedir. Çıkış gerilimi (V_2) hesaplama formülü 4.19' da verildiği gibidir:

$$V_2 = \frac{t_{on}}{T - t_{on}} V_1 = \frac{k}{1 - k} V_1 \quad (4.19)$$

Burada T , tekrar eden periyottur ($T = 1/f$), f , frekansdır, t_{on} , açma zamanı, k , doluluk oranı ($k = \frac{t_{on}}{T}$) ve V_1 giriş gerilimidir.

Daha yüksek veya daha düşük bir giriş gerilimi olabilen bu dönüştürücü ile rastgele çıkış gerilimi elde etmek kolaydır. Endüstriyel uygulamalar için oldukça uygundur. Şekil 4.7' de devre şemasını, açma ve kapama eşdeğer devresini göstermektedir (Luo ve diğ, 2010).



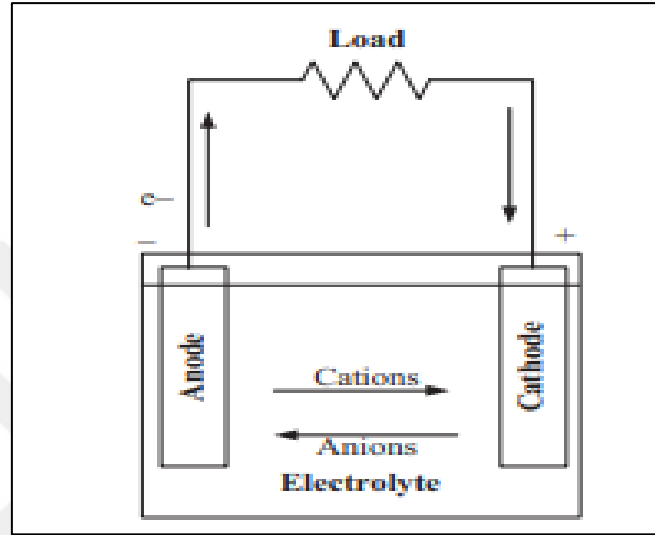
Şekil 4.7. Düşüren -Yükselten dönüştürücü: (a) Devre şeması, (b) Açma eşdeğer devresi (c) Kapama eşdeğer devresi

Tüm temel DC/DC dönüştürücüler, bağlantıyı giriş tarafından çıkış tarafına tuttuğundan ve gerilim aktarım kazancı düşük olduğundan, dönüştürücüler 1960'lardan 1980'lere kadar geliştirilmiştir. Çok sayıda dönüştürücü vardır, örneğin, Push-Pull dönüştürücü, Fly-back dönüştürücü, Yarım Köprü dönüştürücü, Köprü dönüştürücü ve zeta (veya ZETA) dönüştürücü gibi çok sayıda dönüştürücüdür. Genellikle, bu dönüştürücüler yüksek aktarım gerilimi kazancına ve her iki taraf arasında yüksek yalıtıma sahiptir. Kazançları genellikle, birkaç bin kez olabilen transformatörün (N) dönüş oranına bağlamaktadır (Luo ve diğ, 2010).

4.5. Batarya

Yenilenebilir enerji kaynaklarının yüksek penetrasyonu ve son on yılda elektrikli araçlara yönelik artan talep, pillerin küresel enerji geleceğinde giderek daha önemli bir rol oynamasına neden olmuştur. Bir elektrokimyasal oksidasyon-redüksiyon (redoks) işlemi ile pillerin aktif bileşenlerinde bulunan kimyasal enerji, elektrik enerjisine dönüştürülürdür. Bu tür tepkimelerde elektronlar bir maddeden diğerine bir elektrik devresi aracılığıyla aktarılmaktadır. Şekil 4.8' de tek bir hücrenin (bir pilin temel yapı bileşeni) çalışma mekanizmasını göstermektedir. İki elektrot (anot ve katot), yük transfer ortamı olarak hizmet eden bir elektrolit bileşenine daldırılır. Elektrokimyasal işlem sırasında dış devreye elektron verirken anot oksitlenirken, dış devreden elektronları emerken katot indirgenir. Elektrolit ve katot tipine bağlı olarak proses tersinir veya tersinmez olabilmektedir. Şarj edilebilir pillere ikincil piller, şarj edilemeyen pillere ise

birincil piller denmektedir. Birincil piller uzun bir raf ömrüne, düşük ila orta deşarj oranlarında yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir ve çok az bakım gerekmektedir. Yüksek güç yoğunluğu, yüksek deşarj oranı, düz deşarj eğrileri ve olağanüstü düşük sıcaklık performansı, yeniden şarj olma yeteneklerine ek olarak ikincil pillerin tüm özellikleridir (Ginart, 2019).



Şekil 4.8. Deşarj sırasında tek bir pil hücresinin temel işlevi

İkincil piller de kullandıkları kimya türüne göre sınıflandırılabilir. Aşağıdakiler aralarında en yaygın olanlardır:

- 1- Kurşun asit piller.
- 2- Nikel-kadmiyum piller.
- 3- Lityum iyon piller

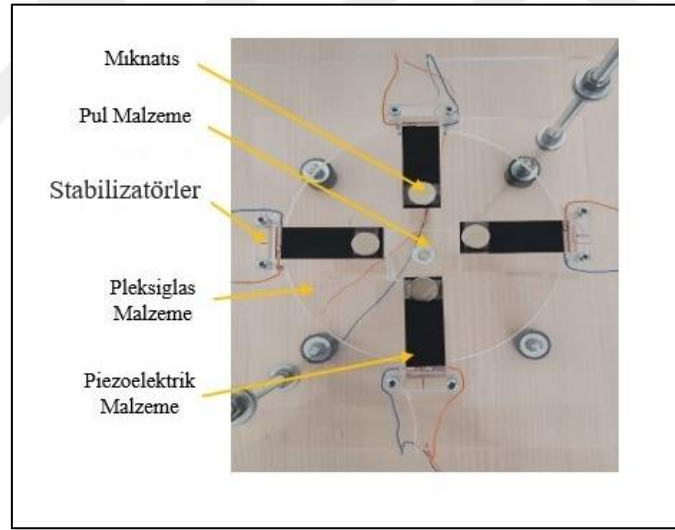
5. MATERYAL VE YÖNTEM

5.1. Giriş

Bu araştırmada piezoelektrik malzemelerin güç üreticisi olarak kullanımı incelenmiştir. Rüzgar santrallerinin kanat yapıları alınarak optimum verimliliğe sahip kanat türü seçilmiş ve bu yapıya uygun kanat yapısı kullanılmıştır.

5.2. Önerilen Piezoelektrik Enerji Hasatçısının Yapısı

Önerilen cihazın ana unsuru, piezoelektrik malzemenin titreşiminin sağlanmasıdır. Bu titreşim işlemi farklı tasarımlar ile sağlanabilmektedir. Önerilen yapıda piezoelektrik malzeme sabit bir taban üzerine yerleştirilmiştir. Piezoelektrik malzemelerin bir tarafları tabana sabitlenerek diğer ucu titreşim için serbest bırakılmıştır. Salınım yapan uçlara da mıknatıslar yerleştirilmiştir. Şekil 5.1’ de önerilen yapı gösterilmektedir.



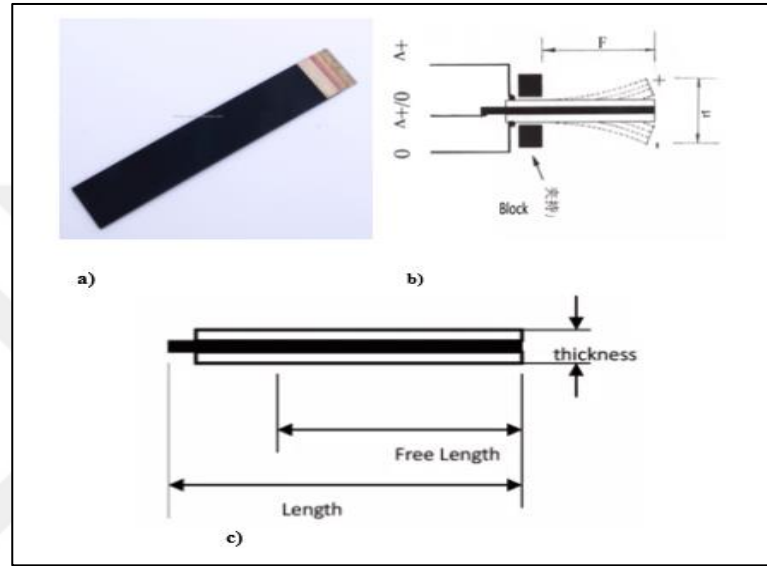
Şekil 5.1. Piezoelektrik jeneratörün tabanı

Pul malzeme vasıtasıyla bu tabanın tümü rüzgar türbinine dönen şaft ile bağlıdır. Dört piezoelektrik malzeme kullanılmıştır. Her bir piezoelektrik malzeme ile diğeri arasındaki açı 90 derece olacak şekilde düzenlenmiştir. Kullanılan piezoelektrik seramiklerin teknik özellikleri Tablo 5.1’ de verilmiştir:

Tablo 5.1. Piezoelektrik Aktüatörün Özellikleri

Tipi	Uzunluk (mm)	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)	Serbest uzunluk (mm)	Gerilim(dcv)	Sapma (mm)	Kuvvet (mN)
QD A60*20*0,7	60	20	0,7	50	150	≥ 2,6	≥ 450

Şekil 5.2’ de piezoelektrik malzemeleri ve piezoelektrik malzemenin yapısı göstermektedir.



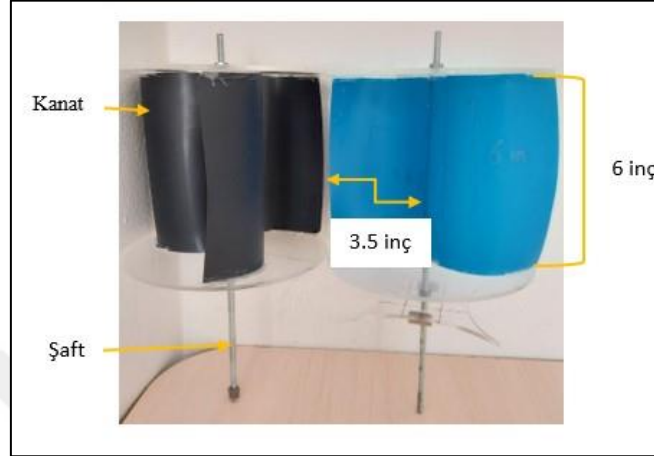
Şekil 5.2. a) Piezoelektrik malzeme , b) Piezoelektrik malzeme yapısı , c) Piezoelektrik malzeme inşaatı

Piezo aktüatörler, uzunluk olarak genişleyip büzülebilen bir çift piezoelektrik elemandan yapılmıştır. Sensör olarak kullanıldığında eğilme, bir tarafın gerilmesine ve diğerinin sıkışmasına neden olur ve duyulabilir aralıkta bir yanıt frekansına sahip olmak, bimorf elemanın yüksek hassasiyetli bir ses sensörü olarak kullanılmasına izin vermektedir. Bir aktüatör olarak kullanıldığında, bir elektrik girişi, çok çeşitli uygulamalarda bir anahtarlama elemanı olarak kullanılabilen bir bükme kuvveti ile sonuçlanmaktadır (Alibaba).

5.3. Savonious Rüzgar Türbinler Tasarımı

Bu çalışmada biri iki kanatlı, diğeri üç kanatlı olmak üzere iki tip dikey rüzgar türbini tasarlanmıştır. İki modelden hangisinin daha hızlı dönme yeteneğine sahip olduğunu

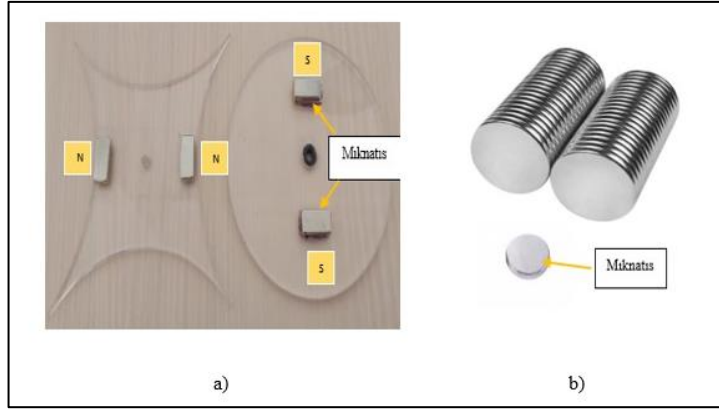
bulmak için her iki model de aynı boyuttadır. Türbin uzunluğu 6 inç ve her kanatın açık genişliği 5 inçtir. Kanat büküldüğünde yarıçapı 3,5 inç oluşmaktadır. Şekil 5.3' te her iki savonius rüzgar türbinleri gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Tasarlanan savonius rüzgar türbinleri

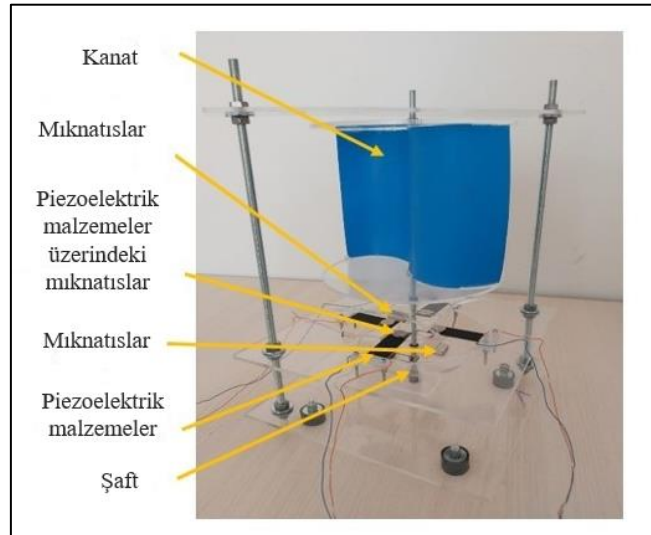
5.4. Manyetik Tasarımı

Mıknatıslar, önerilen cihazda önemli bir görev yapmaktadır. Mıknatıslar, rüzgar türbini dönerken dönerek piezoelektrik malzemelerin titreşimini sağlamak için kullanılmaktadır. Sistemde 4 adet neodimyum mıknatıs kullanılmıştır. Mıknatıslar 20x10x5 mm boyutlarındadır. Benzer kutuplardan (Kuzey Kutbu) iki adet mıknatıs, dönen şafta sabitlenmiş bir pleksiglas malzemeye sabitlenerek rüzgar kanadının altına yerleştirilmiştir. Bu mıknatıslar piezoelektrik malzemeler üzerine kurulu mıknatıslar ile karşılıklıdır. Diğer iki mıknatısın benzer kutupları (güney kutupları) vardır ve pleksiglas malzeme piezoelektrik malzemenin altına sabitlenmiştir. Üst mıknatıslar (kuzey kutupları) ters sırada piezoelektrik malzemelerin altındaki mıknatısların (güney kutupları) ters şeklinde yerleştirilmiştir. Piezoelektrik malzemeler üzerine monte edilen neodimyum mıknatıslar, 15 mm çapında dairesel bir şekle sahiptir. Şekil 5.4 (a)' da mıknatıs malzemeler, Şekil 5.4 (b)' de ise piezoelektrik malzemeler üzerindeki mıknatıslar göstermektedir.



Şekil 5.4. a) Mıknatıs malzemeler, b) Piezoelektrik malzemeler üzerindeki mıknatıslar.

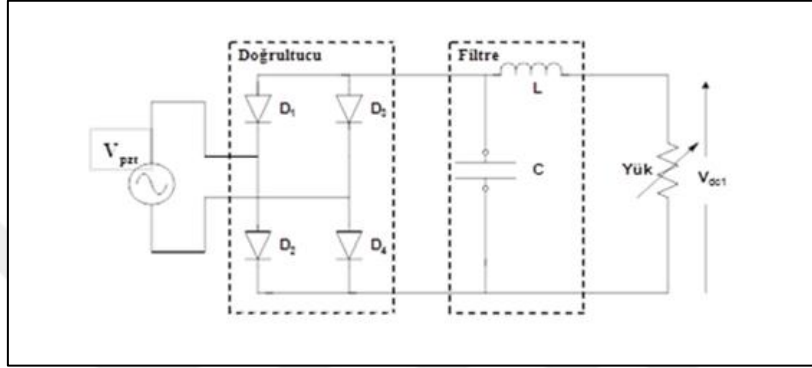
Önerilen cihaz, rüzgara maruz kaldığında dikey türbinin dönüşü yoluyla elektrik enerjisi üretme kabiliyetine sahiptir. Türbin döndüğünde, dönen mile bağlı mıknatıslar türbinle birlikte döner ve böylece dönen mile bağlı mıknatıslar ile piezoelektrik malzemelere bağlı mıknatıslar arasında manyetik kuvvet üretilmektedir, ayrıca piezoelektrik malzemelerin titreşimine yol açar, böylece elektrik enerjisi üretecektir. Üretilen elektrik enerjisinin kullanılan mıknatısların sayısına ve boyutuna bağlıdır. Türbin ile dönen mıknatıslar ile piezoelektrik malzemelere bağlı mıknatıslar arasındaki mesafenin yanı sıra, türbin dönüş hızı da üretilen enerjiyi etkilemektedir. Şekil 5.5’ te rüzgar tahrik yapısı ve piezoelektrik malzemeleri gösterilmektedir.



Şekil 5.5. Önerilen enerji hasatçısı tasarımı

5.5. Elektronik Devre Tasarımı

Piezoelektrik malzemeler tarafından üretilen değişken ve kararlı olmayan AC gerilim formundadır. Bu gerilimi depolamak ve kullanmak için DC forma dönüştürmek gerekmektedir. Bu işlem için bir doğrultucu ve filtre devresi kullanmak gereklidir. Çıkış gerilimini DC forma dönüştürmek için kullanılan devre yapısı Şekil 5.6' da gösterilmiştir. Burada yük olarak omik yük kullanılmıştır.



Şekil 5.6. Piezoelektrik çıkış gerilimi ile elektronik devre bağlanması

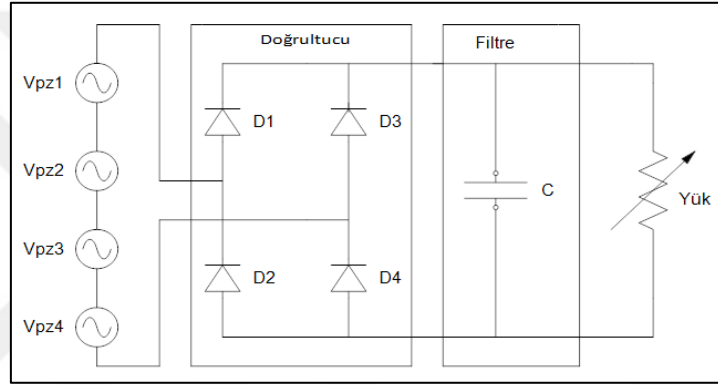
Şekil 5.6' da gösterilen devre bir piezoelektrik elemanın çıkış geriliminin DC bir gerilim elde etmek için kullanılmıştır.

6. DENEYSEL SONUÇLAR

Farklı devre konfigürasyonları için çalışma modları belirlenerek sistem için en verimli çalışma koşulu belirlenmeye çalışılmıştır.

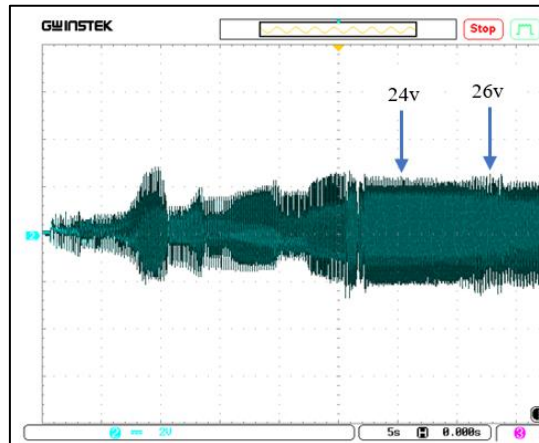
6.1. Mod 1

Tüm piezoelektrik seramikler seri devre bağlanmıştır. Doğrultucudan ne kadar gerilim alınabileceğini bulmak için ve aynı sırada kondansatörde ne kadar gerilimin arttığını ve ne kadar enerji depolandığını bilmek için aşadaki şekilde bağlanmıştır:



Şekil 6.1. Seri devre bağlantısı

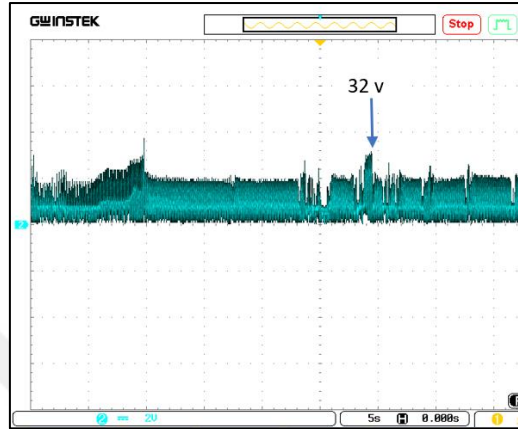
6.1.1. Piezoelektrik Çıkış Gerilimi ($V \times 10$)



Şekil 6.2. Piezoelektrik çıkış gerilimi

Şekil 6.2' de görüldüğü gibi, gerilim 2 s de sabitlenir ve gerilim 24 V'a ulaşmaktadır. 8 s de, rüzgar hızındaki farka göre gerilim artmaya ve azalmaya başlar ve en yüksek gerilimin değeri 12,8 s de 26V' tır.

6.1.2. Doğrultucu Çıkış Gerilimi ($V \times 10$)

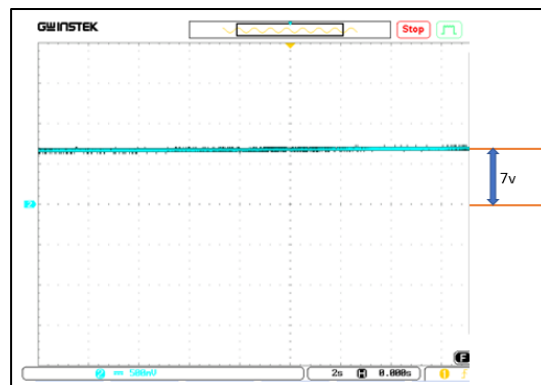


Şekil 6.3. Doğrultucu çıkış gerilimi (probe x10)

Yukarıdaki Şekil 6.3' te doğrultucun çıkış gerilimi göstermektedir ve gerilim farklı hızlarda ölçülmüştür ve elde edilen en yüksek gerilim 4,5 s de 32 V' tır.

6.1.3. Kondansatör Çıkış Gerilimi ($V \times 10$)

Şekil 6.4' te kondansatörün çıkış gerilimi göstermektedir, çıkış gerilimi üç dakika ve on sekiz saniyede 6 V 'a ulaşmıştır ve kapasitörün bu durumda şarj edilmesinin daha uzun zaman aldığı görülmüştür. Ayrıca 3,18 dakika geçtikten sonra gerilim 7V' te sabitlenmektedir.



Şekil 6.4. Kondansatör çıkış gerilimi

Çıkışa bağlanan (1000µF) bir kapasitörde depolanan enerji ve güç değerini hesaplamak için aşağıdaki denklemleri kullanılabilmektedir:

$$E_C = \frac{1}{2} C V_C^2 \quad (6.1)$$

$$P = \frac{E_C}{t} \quad (6.2)$$

Burada:

E_C : Depolanan enerji

C : Kapasitansı

V_C : Olaşmış gerilimi

t : Zaman

P : Güç

$$E_C = \frac{1}{2} \times 1000 \times 10^{-6} \times (6^2)$$

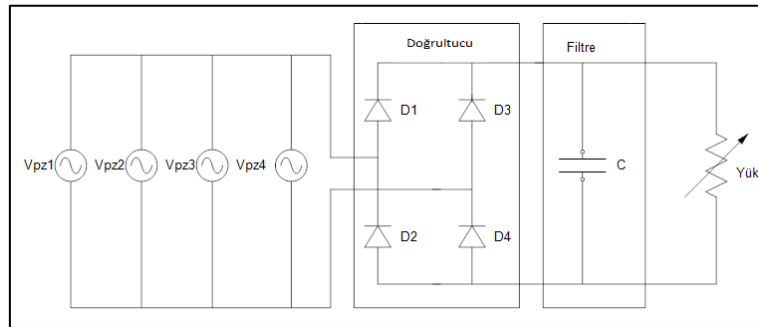
$$E_C = 0,018 \text{ Joule}$$

$$P = \frac{0,018}{3,18}$$

$$P = 0,000091 \text{ W}$$

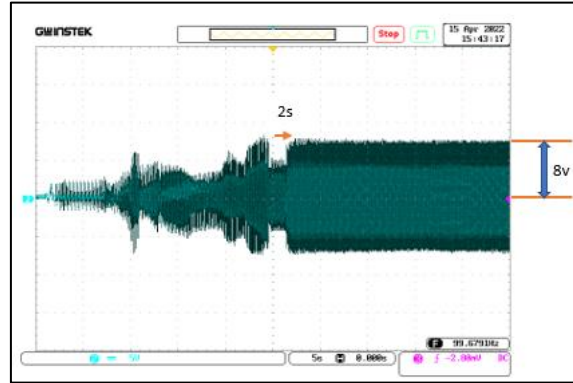
6.2. Mod 2

Tüm piezoelektrik seramikler paralel olarak bağlanmıştır. Doğrultucudan ne kadar gerilim alınabileceğini bulmak için ve aynı sırada kondansatörde ne kadar gerilimin arttığını ve ne kadar enerji depolandığını bilmek için aşağıdaki şekilde bağlanmıştır.



Şekil 6.5. Paralel devre bağlantısı

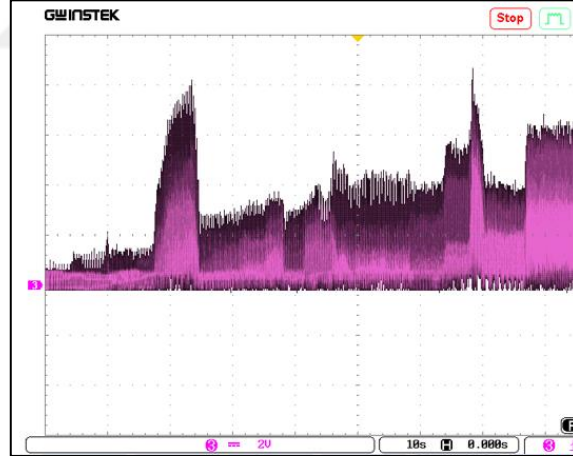
6.2.1. Piezoelektrik Çıkış Gerilimi



Şekil 6.6. Piezoelektrik çıkış gerilimi

Şekil 6.6' da piezoelektrik generatör çıkış gerilimini göstermektedir. Tüm piezo elemanlarını paralel bağladığında 2 saniyede 8 Volt kararlı gerilim elde edildiği görülmüştür.

6.2.2. Doğrultucu Çıkış Gerilimi



Şekil 6.7. Doğrultucu çıkış gerilimi

Yukarıdaki şekil 6.7' de doğrultucun çıkış gerilimi göstermektedir. Çıkış farklı hızlarda alınmıştır ve elde edilen en yüksek gerilim 19 s de 8,8 V' tır.

6.2.3. Kondansatör Çıkış Gerilimi

Şekil 6.8' de kondansatörün çıkış gerilimi göstermektedir. Çıkış gerilimi (0,35 saniye)' de 5 V'a , (bir dakika ve 11 saniye)' de 6 V'a ve (1 dakika ve 31 saniye)' de 8 V' a ulaşmıştır. Kapasitörün bu durumda şarj edilmesinin daha kısa zaman aldığı görülmüştür. Mod 1'de daha önce kullanılan kondansatör ile aynı özelliklere sahip bir kondansatörde depolanan enerji ve güç denklemleri (6.1), (6.2) kullanılarak hesaplanmıştır.

A- 0,35 saniyede

$$E_C = \frac{1}{2} \times 1000 \times 10^{-6} \times (5^2) , \quad E_C = 0,0125 \text{ Joule}$$

$$P = \frac{0,0125}{35} , \quad P = 0,000357 \text{ W}$$

B- 1 dakika ve 11 saniyede

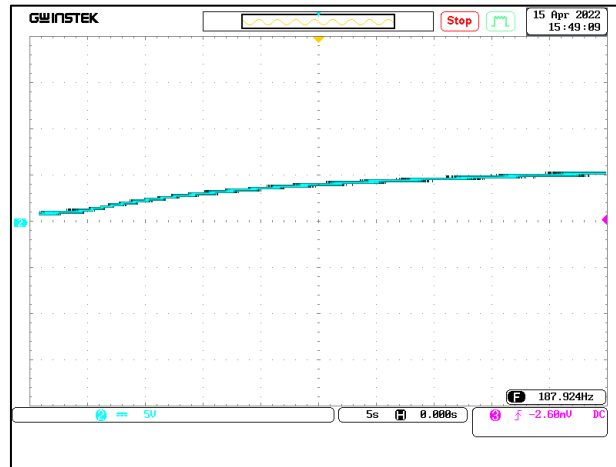
$$E_C = \frac{1}{2} \times 1000 \times 10^{-6} \times (6^2) , \quad E_C = 0,018 \text{ Joule}$$

$$P = \frac{0,018}{1,11} , \quad P = 0,000253 \text{ W}$$

C- 1 dakika ve 31 saniyede

$$E_C = \frac{1}{2} \times 1000 \times 10^{-6} \times (8^2) , \quad E_C = 0,032 \text{ Joule}$$

$$P = \frac{0,032}{1,31} , \quad P = 0,000352 \text{ W}$$



Şekil 6.8. Kondansatör çıkış gerilimi

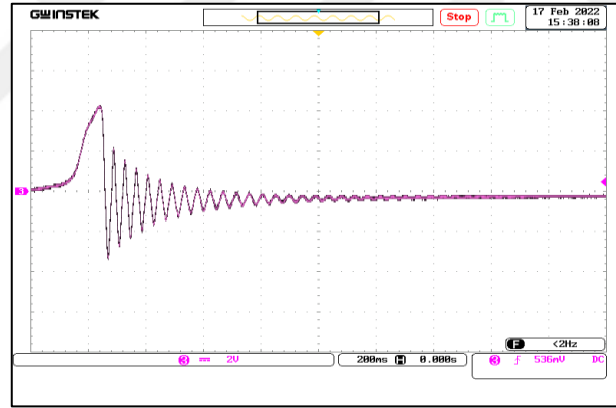
Tablo 6.1. Paralel ve Seri Durumu Arasındaki Sonuçları Karşılaştırması

Zamam (dakika)	Seri durumunda kapasitörde depolanan enerji (J)	Paralel durumu kapasitörde depolanan enerji (J)
0,35	-	0,0125
1,11	-	0,018
1,31	-	0,032
3,18	0,018	-

6.3. Mod 3

6.3.1. Piezoelektrik Çıkış Gerilimi (Tek)

Bu çalışmada sadece bir piezoelektrik malzemeden alınacak veriler verilmiştir. Diğer piezoelektrik malzemeler de aynı değerleri verecektir. Şekil 6.9’ da bir piezonun tek salınımda ürettiği gerilimi gösterilmiştir.



Şekil 6.9. Tek piezoelektrik çıkış gerilimi

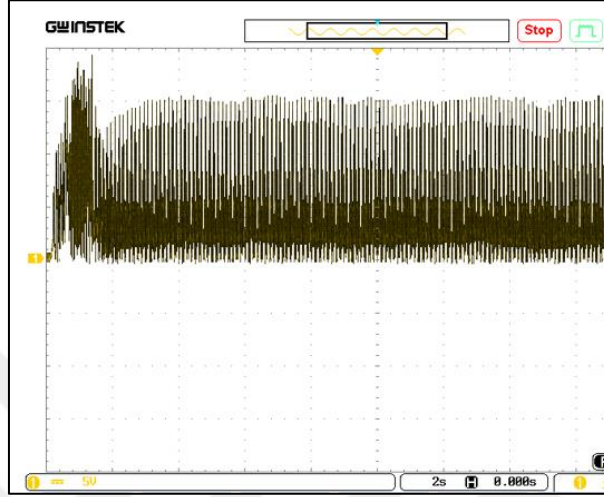
Şekil 6.9’ dan görüldüğü üzere harekete başladığı zaman yüksek bir genlikle sonra sönümlenerek sıfıra düştüğü görünmüştür.

6.3.2. İki Piezoelektrik İle İki Doğrultucu (Seri Durumunda)

Doğrultucu gerilim çıkışının sonuçları elde edilmiş ve kapasitörde depolanabilecek enerji değerini belirlenmiştir. Birinci piezo elemanı birinci doğrultucu ile bağlanmıştır ve ikinci piezo elemanı ikinci doğrultucuya bağlanmıştır. Sonra birinci doğrultucu çıkışı ile ikinci

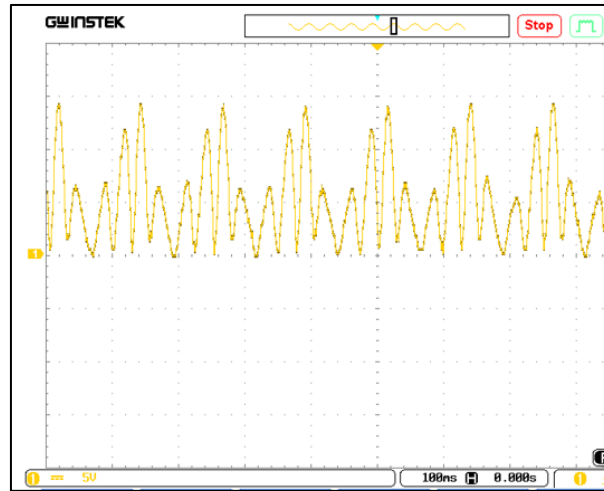
doğrultucu çıkışa seri durumunda bağlanarak sonuçlar alınmıştır. Bu durumda iki adet piezoelektrik ve iki doğrultucu kullanılmıştır.

6.3.2.1. Doğrultucu Çıkış Gerilimi



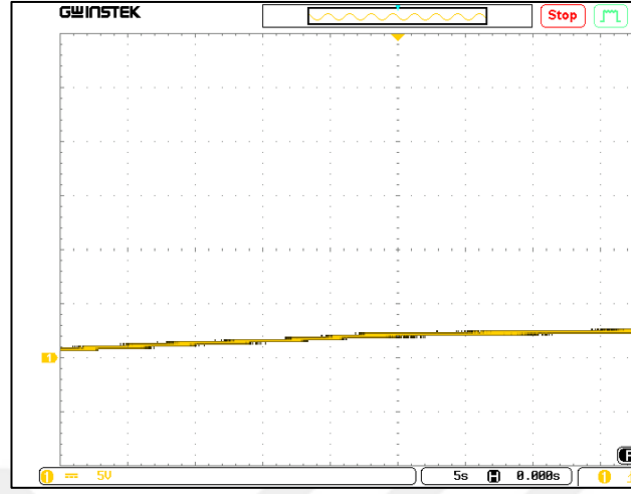
Şekil 6.10. Doğrultucu çıkış gerilimi

Yukardaki şekilden görüldüğü gibi, piezoyu doğrultucuya bu şekilde bağlarken çıkış gerilimi 15V'a ulaşmıştır. Aşağıdaki şekil çıkış gerilimi büyütülmüş hali göstermektedir.



Şekil 6.11. Doğrultucu çıkış gerilimi (Büyütülmüş hali)

6.3.2.2. Kondansatör Çıkış Gerilimi



Şekil 6.12. Kondansatör çıkış gerilimi

Şekil 6.12' de kondansatörün çıkış gerilimi göstermektedir. Çıkış gerilimi (bir dakikada) 2,8 V'a ulaşmıştır. Bu durumda daha önce kullanılan kondansatör ile aynı özelliklere sahip bir kondansatörde depolanan enerji ve güç denklemleri (6.1) ve (6.2) kullanılarak hesaplanmıştır.

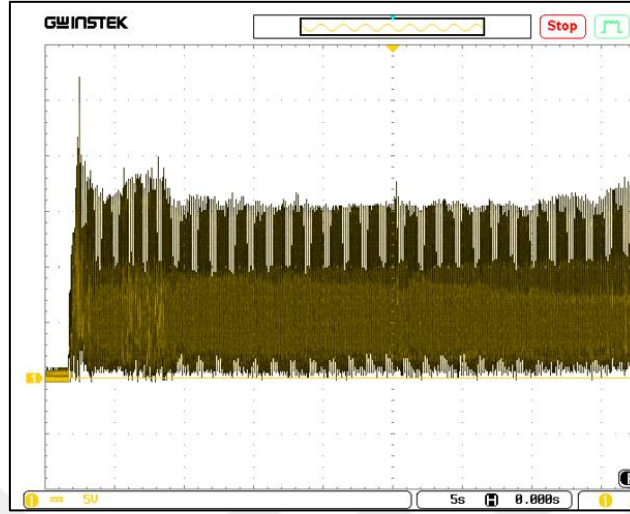
$$E_C = \frac{1}{2} \times 1000 \times 10^{-6} \times (2,8^2), \quad E_C = 0,00392 \text{ Joule}$$

$$P = \frac{0,00392}{60}, \quad P = 0,000065 \text{ W}$$

6.3.3. Üç Piezoelektrik İle Üç Doğrultucu (Seri Durumunda)

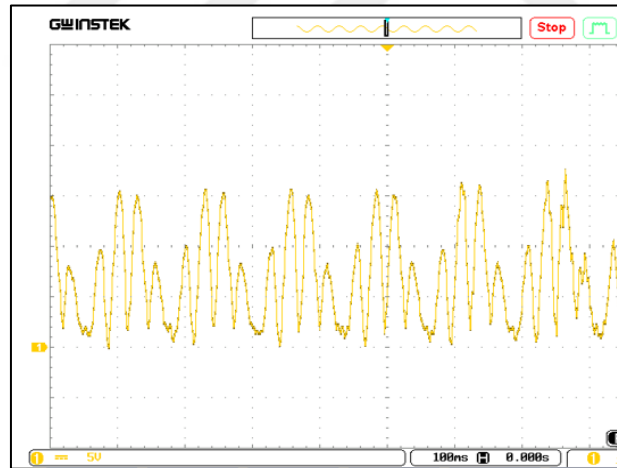
Doğrultucu gerilim çıkışının sonuçları elde edilmiş ve kapasitörde depolanabilecek enerji değerini belirlenmiştir. Birinci piezo elemanı birinci doğrultucuya, ikinci piezo elemanı ikinci doğrultucuya ve üçüncü piezo elemanı üçüncü doğrultucu ile bağlanmıştır. Sonra birinci doğrultucu çıkışı ile ikinci doğrultucu çıkışı ile üçüncü doğrultucu çıkışa seri durumunda bağlanılarak sonuçlar alınmıştır. Bu durumda üç adet piezoelektrik ve üç doğrultucu kullanılmıştır.

6.3.3.1. Doğrultucu Çıkış Gerilimi



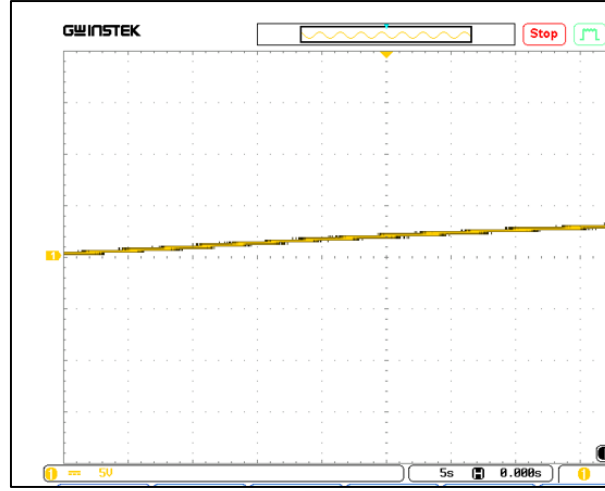
Şekil 6.13. Kondansatör çıkış gerilimi

Yukardaki şekilden görüldüğü gibi, piezo doğrultucuya bu şekilde bağlarken çıkış gerilimi 18 V'a ulaşmıştır. Aşağıdaki şekil çıkış gerilimi büyütülmüş hali göstermektedir.



Şekil 6.14. Doğrultucu çıkış gerilimi (Büyütülmüş hali)

6.3.3.2 Kondansatör Çıkış Gerilimi



Şekil 6.15. Kondansatör çıkış gerilimi

Şekil 6.15' te kondansatörün çıkış gerilimi göstermektedir. Çıkış gerilimi (bir dakikada) 3,5 V'a ulaşmıştır. Bu durumda daha önce kullanılan kondansatör ile aynı özelliklere sahip bir kondansatörde depolanan enerji ve güç denklemleri (6.1) ve (6.2) kullanılarak hesaplanmıştır.

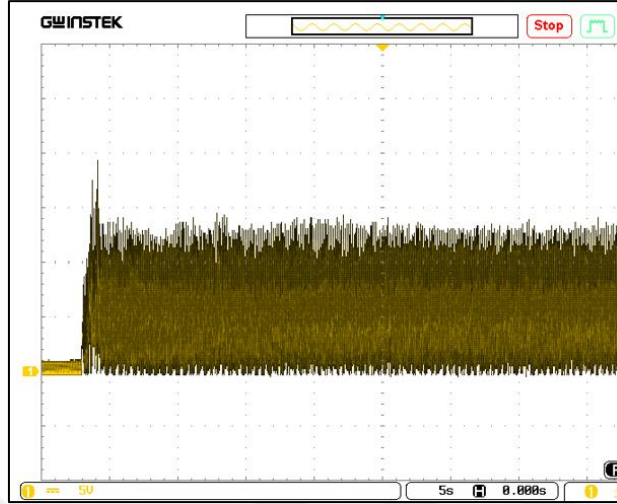
$$E_C = \frac{1}{2} \times 1000 \times 10^{-6} \times (3,5^2), \quad E_C = 0,006125 \text{ Joule}$$

$$P = \frac{0,006125}{60}, \quad P = 0,000102 \text{ W}$$

6.3.4. Dört Piezoelektrik İle Dört Doğrultucu (Seri Durumunda)

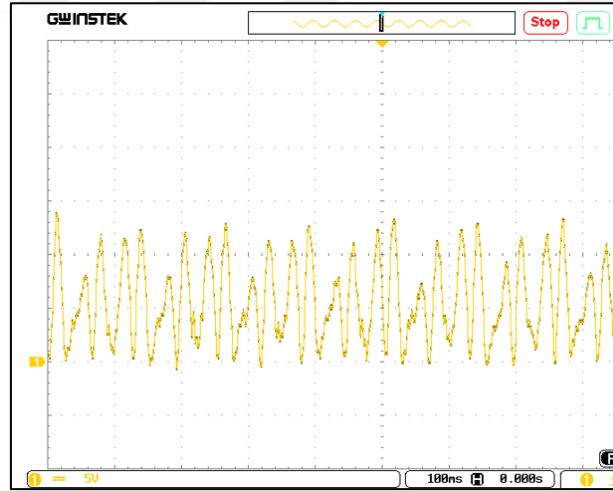
Doğrultucu gerilim çıkışının sonuçları elde edilmiş ve kapasitörde depolanabilecek enerji değerini belirlenmiştir. Birinci piezo elemanı birinci doğrultucuya, ikinci piezo elemanı ikinci doğrultucuya, üçüncü piezo elemanı üçüncü doğrultucuya ve dördüncü piezo elemanı dördüncü doğrultucuya bağlanmıştır. Sonra birinci doğrultucu çıkışı ile ikinci doğrultucu çıkışı ile üçüncü doğrultucu çıkışı dördüncü doğrultucu çıkışa seri durumunda bağlanılarak sonuçlar alınmıştır. Bu durumda dört adet piezoelektrik ve dört doğrultucu kullanılmıştır.

6.3.4.1. Doğrultucu Çıkış Gerilimi



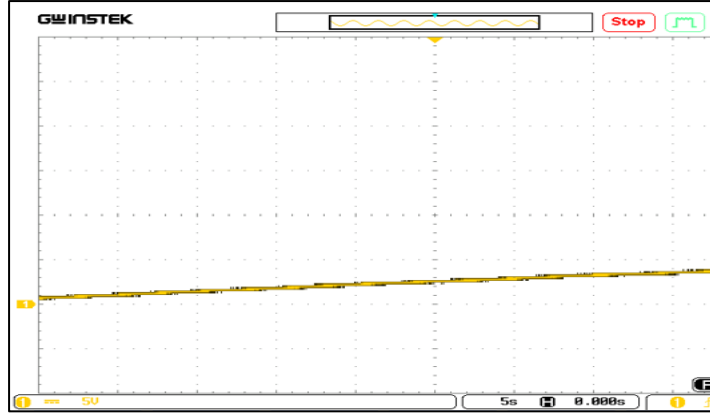
Şekil 6.16. Doğrultucu çıkış gerilimi

Yukardaki şekilden görüldüğü gibi, piezoyu doğrultucuya bu şekilde bağlarken çıkış gerilimi 14V'a ulaşmıştır. Aşağıdaki şekil çıkış gerilimin büyütülmüş halini göstermektedir.



Şekil 6.17. Doğrultucu çıkış gerilimi (Büyütülmüş hali)

6.3.4.2. Kondansatör Çıkış Gerilimi

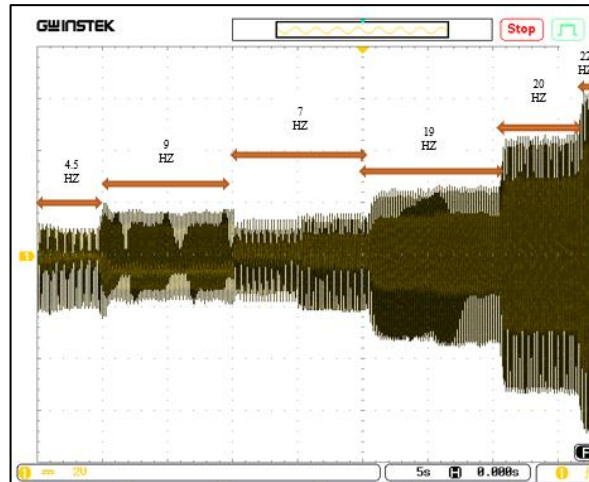


Şekil 6.18. Kondansatör çıkış gerilimi

Şekil 6.18' de kondansatörün çıkış gerilimi göstermektedir. Çıkış gerilimi (bir dakikada) 4 V'a ulaşmıştır. Bu durumda daha önce kullanılan kondansatör ile aynı özelliklere sahip bir kondansatörde depolanan enerji ve güç denklemleri (6.1) ve (6.2) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$E_C = \frac{1}{2} \times 1000 \times 10^{-6} \times (4^2), \quad E_C = 0,008 \text{ Joule}$$
$$P = \frac{0,008}{60}, \quad P = 0,000133 \text{ W}$$

6.3.5. İki Piezoelektrik Elemanı Seri Durumunda Bağlanması



Şekil 6.19. Frekans ile gerilim değişimi

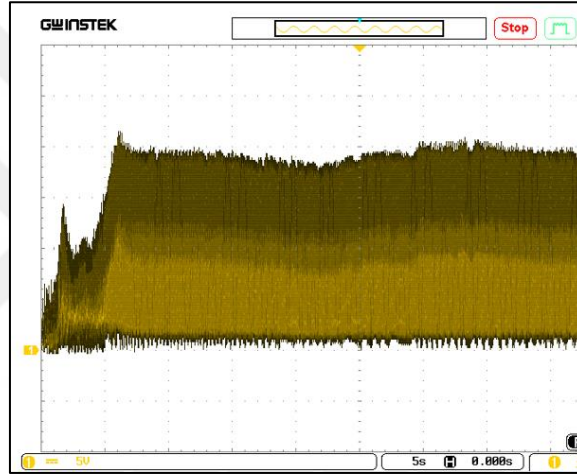
Yukarıdaki şekilden görüldüğü gibi piezoelektrik çıkış gerilimi rüzgar hızına değişine göre değişiyor ve 22 Hz frekansında alabildiğimiz en yüksek gerilim üretilmektedir.

6.4. Mod 4

6.4.1. İki Piezoelektrik İle İki Doğrultucu (Paralel Durumunda)

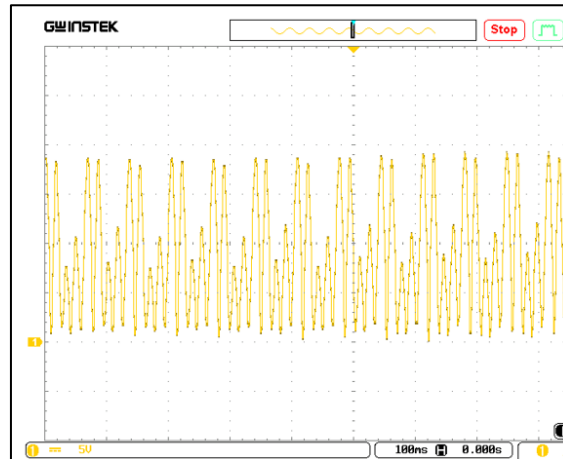
Doğrultucu gerilim çıkışının sonuçları elde edilmiş ve kapasitörde depolanabilecek enerji değerini belirlenmiştir. Birinci piezo elemanı birinci doğrultucu ile bağlanmıştır ve ikinci piezo elemanı ikinci doğrultucuya bağlanmıştır. Sonra birinci doğrultucu çıkışı ile ikinci doğrultucu çıkışa paralel durumda bağlanılarak sonuçlar alınmıştır. Bu durumda iki adet piezoelektrik ve iki doğrultucu kullanılmıştır.

6.4.1.1. Doğrultucu Çıkış Gerilimi



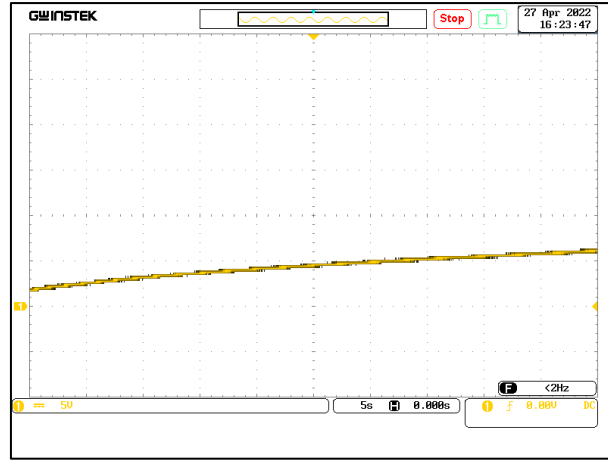
Şekil 6.20. Doğrultucu çıkış gerilimi

Şekil 6.20' dan görüldüğü gibi, piezoyu doğrultucuya bu şekilde bağlarken çıkış gerilimi 21,5 V'a ulaşmıştır. Aşağıdaki şekil çıkış gerilimi büyütülmüş hali göstermektedir.



Şekil 6.21. Doğrultucu çıkış gerilimi (Büyütülmüş hali)

6.4.1.2. Kondansatör Çıkış Gerilimi



Şekil 6.22. Kondansatör çıkış gerilimi

Şekil 6.22' de kondansatörün çıkış gerilimi göstermektedir. Çıkış gerilimi (bir dakikada) 6,5 V'a ulaşmıştır. Bu durumda daha önce kullanılan kondansatör ile aynı özelliklere sahip bir kondansatörde depolanan enerji ve güç denklemleri (6.1) ve (6.2) kullanılarak hesaplanmıştır.

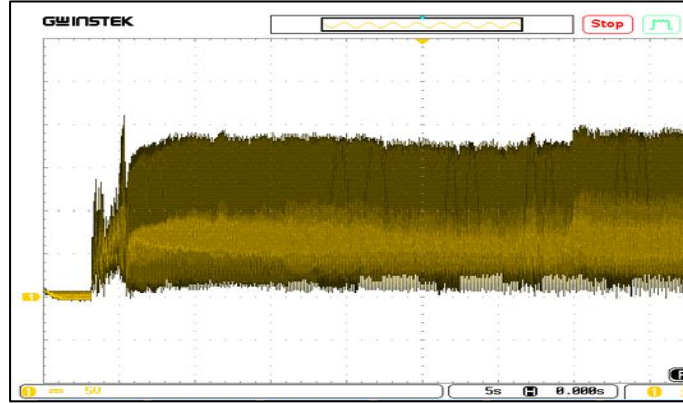
$$E_C = \frac{1}{2} \times 1000 \times 10^{-6} \times (6,5^2),$$
$$P = \frac{0,021125}{60},$$

$$E_C = 0,021125 \text{ Joule}$$
$$P = 0,000352 \text{ W}$$

6.4.2. Üç Piezoelektrik İle Üç Doğrultucu (Paralel Durumunda)

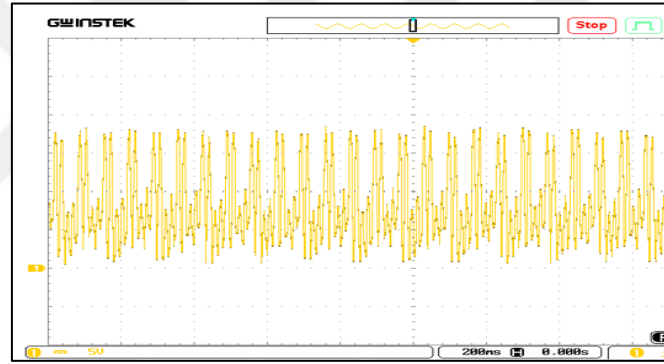
Doğrultucu gerilim çıkışının sonuçları elde edilmiş ve kapasitörde depolanabilecek enerji değerini belirlenmiştir. Birinci piezo elemanı birinci doğrultucu ile bağlanmıştır , ikinci piezo elemanı ikinci doğrultucuya bağlanmıştır ve üçüncü piezo elemanı üçüncü doğrultucu ile bağlanmıştır, sonra birinci doğrultucu çıkışı ile ikinci doğrultucu çıkışı ile üçüncü doğrultucu çıkışa paralel durumunda bağlanarak sonuçlar alınmıştır. Bu durumda üç adet piezoelektrik ve üç doğrultucu kullanılmıştır.

6.4.2.1. Doğrultucu Çıkış Gerilimi



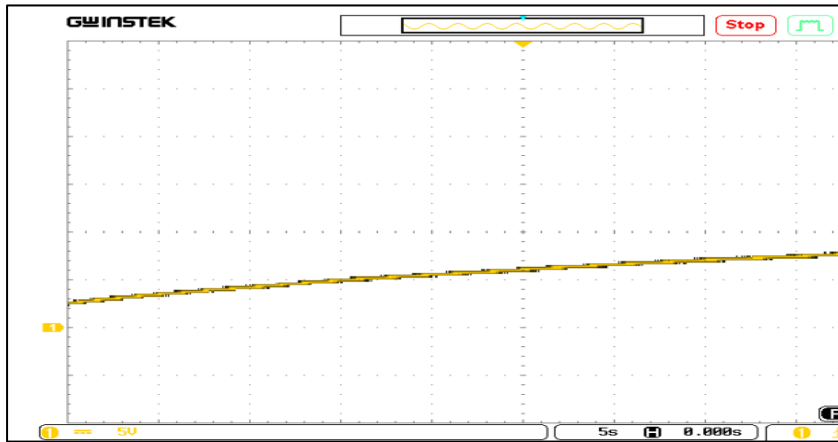
Şekil 6.23. Doğrultucu çıkış gerilimi

Şekil 6.23' ten görüldüğü gibi, piezoyu doğrultucuya bu şekilde bağlarken çıkış gerilimi 20 V'a ulaşmıştır. Aşağıdaki şekil çıkış gerilimi büyütülmüş hali göstermektedir.



Şekil 6.24. Doğrultucu çıkış gerilimi (Büyütülmüş hali)

6.4.2.2. Kondansatör Çıkış Gerilimi



Şekil 6.25. Kondansatör çıkış gerilimi

Şekil 6.25' te kondansatörün çıkış gerilimi göstermektedir. Çıkış gerilimi (bir dakikada) 8 V'a ulaşmıştır. Bu durumda daha önce kullanılan kondansatör ile aynı özelliklere sahip bir kondansatörde depolanan enerji ve güç denklemleri (6.1) ve (6.2) kullanılarak hesaplanmıştır.

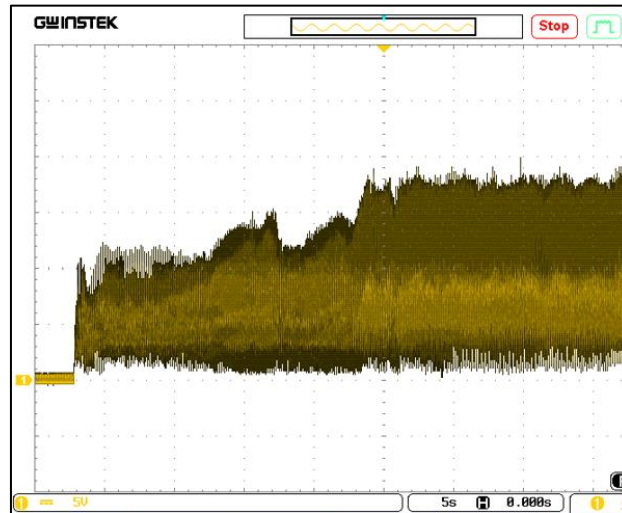
$$E_C = \frac{1}{2} \times 1000 \times 10^{-6} \times (8^2), \quad E_C = 0,032 \text{ Joule}$$

$$P = \frac{0,032}{60}, \quad P = 0,00053 \text{ W}$$

6.4.3. Dört Piezoelektrik İle Dört Doğrultucu (Paralel Durumunda)

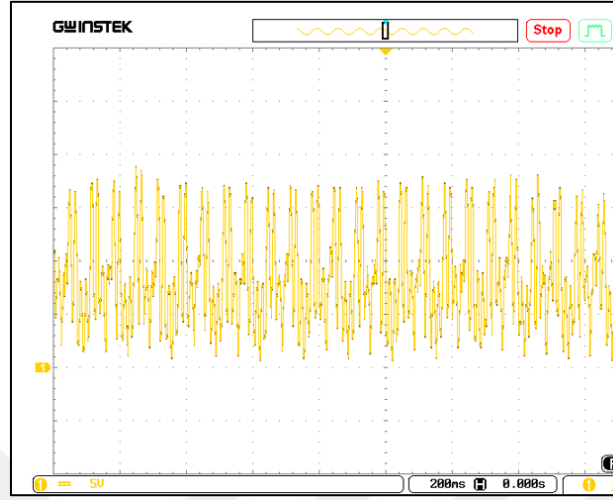
Doğrultucu gerilim çıkışının sonuçları elde edilmiş ve kapasitörde depolanabilecek enerji değerini belirlenmiştir. Birinci piezo elemanı birinci doğrultucuya, ikinci piezo elemanı ikinci doğrultucuya, üçüncü piezo elemanı üçüncü doğrultucuya ve dördüncü piezo elemanı dördüncü doğrultucuya bağlanmıştır. Sonra birinci doğrultucu çıkışı ile ikinci doğrultucu çıkışı ile üçüncü doğrultucu çıkışı dördüncü doğrultucu çıkışa paralel durumunda bağlanılarak sonuçlar alınmıştır. Bu durumda dört adet piezoelektrik ve dört doğrultucu kullanılmıştır.

6.4.3.1. Doğrultucu Çıkış Gerilimi



Şekil 6.26. Doğrultucu çıkış gerilimi

Şekil 6. 26' dan görüldüğü gibi, piezoyu doğrultucuya bu şekilde bağlarken çıkış gerilimi 20 V'a ulaşmıştır. Aşağıdaki şekil çıkış gerilimi büyütülmüş hali göstermektedir.



Şekil 6.27. Doğrultucu çıkış gerilimi (Büyütülmüş hali)

6.4.3.2. Kondansatör Çıkış Gerilimi



Şekil 6.28. Kondansatör çıkış gerilimi

Şekil 6.28' de kondansatörün çıkış gerilimi göstermektedir. Çıkış gerilimi (bir dakikada) 10,5 V'a ulaşmıştır. Bu durumda daha önce kullanılan kondansatör ile aynı özelliklere sahip bir kondansatörde depolanan enerji ve güç denklemleri (6.1) ve (6.2) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$E_C = \frac{1}{2} \times 1000 \times 10^{-6} \times (10,5^2),$$

$$E_C = 0,055 \text{ Joule}$$

$$P = \frac{0,055}{60},$$

$$P = 0,00092 \text{ W}$$

Tablo 6.2. Paralel ve Seri Durumu Arasındaki Sonuçları Karşılaştırması

Zaman (Dakika)	Elemanları bağlayın sayısı	Seri durumu kondansatörde depolanan enerji (E_C) (J)	Paralel durumu kondansatörde depolanan enerji (E_C) (J)
1	İki piezoelektrik ile iki doğrultucu (çıkış doğrultucunu bağlantısı)	0,00392	0,021125
1	Üç piezoelektrik ile üç doğrultucu (çıkış doğrultucunu bağlantısı)	0,006125	0,032
1	Dört piezoelektrik ile dört doğrultucu (çıkış doğrultucunu bağlantısı)	0,008	0,055

Tablo 6.3. Paralel Durumları Arasındaki Sonuçları Karşılaştırması

Zaman (Dakika)	Elemanları paralel bağlayın sayısı	Kondansatörde depolanan enerji (E_C) (J)
1	İki piezoelektrik ile iki doğrultucu (çıkış doğrultucu paralel bağlantısı)	0,021125
1	Üç piezoelektrik ile üç doğrultucu (çıkış doğrultucu paralel bağlantısı)	0,032
1	Dört piezoelektrik ile dört doğrultucu (çıkış doğrultucu paralel bağlantısı)	0,055
(0,35-1,11-1,31)	Tüm piezoelektrik seramikler paralel ile bir doğrultucu	(0,0125-0,018- 0,032)

Tablo 6.4. Seri Durumları Arasındaki Sonuçları Karşılaştırması

Zaman (Dakika)	Elemanları seri bağlayın sayısı	Kondansatörde depolanan enerji (E_C) (J)
1	İki piezoelektrik ile iki doğrultucu (çıkış doğrultucu seri bağlantısı)	0,00392
1	Üç piezoelektrik ile üç doğrultucu (çıkış doğrultucu seri bağlantısı)	0,006125
1	Dört piezoelektrik ile dört doğrultucu (çıkış doğrultucu seri bağlantısı)	0,008
3,18	Tüm piezoelektrik seramikler seri ile bir doğrultucu	0,018

Tablo 6.5. (Kocaeli – İzmit – Yenişehir)’ de Rüzgar Hızı

İzmit Kandıra Yolu (m/sn)	Gazi Mustafa Kemal Cadesi (İç sokak) (m/sn)	Gazi Mustafa Kemal Cadesi (İç sokak) Normalda (arabasız) (m/sn)
1,4	2,8	0,8
2,6	3	0,9
2,8	1,2	1,1
3	1,7	1,2
3,6	1,8	1,3
4,2	2	1,4
4	2,5	1,5
4,5	2,2	
3,5	1,7	
3,1	2,3	
3,2	2	
3,5	2,2	
4	2,4	
4,6		
2,6		
1,2		
3,9		
4,8		
5		
5,2		
5,7		
6,2		
4		
4,5		
3,1		
4,8		
4		
3,7		
5,3		
2,9		
3,2		
Ortalama	Ortalama	Ortalama
$\frac{118,1}{31} = 3,8$	$\frac{27,8}{13} = 2,14$	$\frac{8,2}{7} = 1,17$

7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bizim amacımız türbünün yol kenarına koyup rüzgarla dönmesi ile enerji üretmektir. Bu yol kenarlarında oluşan rüzgar hızları (Tablo 6.5' te) gösterilmiştir. Bu rüzgar hızları tasarlanmış olan rüzgar türbinine uygulandığında türbinin dönüş hızlarının ne olacağı belirlenmemiş, türbinin sıfır ila maksimum hızları arasında dönmesi durumunda piezoelektrik malzemelerden alınacak gerilim ve güçler belirlenmeye çalışılmıştır. Çalışmada giriş enerjisi olarak mil gücü çıkış enerjisi olarak piezoelektrik malzemelerden alınan elektrik enerjisi kullanılmıştır. Giriş enerjisi ve büyüklüğü olarak rüzgar enerjisi ve hızı kullanılmamıştır. Türbin verimi ayrıca üzerinde çalışılacak bir konu olarak belirlenmiştir.

4 adet titreşim ile enerji üreten piezoelektrik seramikler için tahrik enerjisi rüzgar olan bir prototip ürün geliştirilmiştir. 4 adet piezoelektrik seramik ve çıkış doğrultucuları farklı topolojilerle seri ve paralel bağlanarak ölçümler alınmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. En yüksek gerilim ve enerji üreten topolojiler belirlenmeye çalışılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde, ulaşılan en iyi sonuçların paralellik bağlantı durumunda olduğu görülmüştür. Çünkü yaklaşık bir dakika boyunca depolanan enerji 0,055 Joule olarak hesaplanmıştır. Böylece bir saat içinde elde edilebilecek enerji 3,3 Joule ve bütün gün boyunca elde edebileceğimiz enerjinin ise 79,2 Joule olabileceği hesaplanmıştır. Üretilen enerji seviyesi düşük olduğu için prototip ürün küçük güçlü kablosuz sensörler gibi cihazların beslenmesi amacı ile kullanılabilir. 4 adet piezo malzeme yerine aynı mil üzerinde çok daha fazla sayıda piezoelektrik malzeme yerleştirilmesi ile enerji seviyesinin yükseltilmesi mümkündür. Bu durumda daha yüksek güçlü yüklerin beslenmesi de mümkün olabilecektir. Piezoelektrik malzemelerin verimleri günümüzde düşüktür. Ancak bu malzemeler üzerindeki araştırmalar devam etmektedir. Yeni çalışmalar ile verimleri gittikçe artmaktadır. Yakın gelecekte artan verimlerle piezoelektrik malzemeler ile enerji hasadı uygulamalarının artması beklenmektedir. Bu cihazın önemli avantajlarından bir diğeri de çevreye herhangi bir zararı olmamasıdır.

7.1. Öneriler

Zaman dar olduğu için birçok olası ayarlama, test ve deney ertelenmiştir. İki kanat ve üç kanat savonious rüzgar türbinlerinin yol kenarı rüzgarlarında hangi hızlarda döneceğini ve (Tablo 6.5' te) rüzgar hızlarında ne kadar enerji depolabileceğı belirlenmelidir. Hangi türbin daha iyi sonuçlar vereceğı de sonraki çalışmalarda incelenebilir. Piezomalzemelerin titreşimi için yeni mekanik tasarımlar yapılarak malzemenin rezonans frekansında çalışması sağlanabilecek tasarımlar üzerine çalışmalar yapılabilir.



KAYNAKLAR

- Akgün, M. (2018). Piezoelektrik Özellikli, Polimer Nano Kompozit Malzeme Geliştirilmesi ve Titreşim Sensörü Olarak Kullanılabilirliğinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa. 2018-28741578.
- 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. *IEEE*, 978-1-4673-4810.
- Arnold, D.P. (2007). Review of Microscale Magnetic Power Generation. *IEEE Transactions on Magnetics*, 43(11).
- Avşar, A.L. (2016). Design, Analysis And Experimental Verification of A Piezoelectric Vortex Energy Harvester. Doctoral Dissertation, Middle East Technical University, School of Natural And Applied Sciences.
- Ballato, A. (1996). Piezoelectricity: History and New Thrusts. *IEEE Ultrasonics Symposium, Proceedings*. San Antonio, USA, 3-6 November 1996.
- Büyükköşkin, Ö. (2018). Piezoelektrik Malzemeler Yardımıyla Rüzgar Enerjisinden Elektrik Üretimi. Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- 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): 043001.
- Çanakçı, M., Özsezen, A. N. (2004). Dizel Motorları Yakıt Enjeksiyon Sistemlerindeki Gelişmeler. Kocaeli Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Makina Eğitimi Bölümü.
- Çetin, H.G. (2015). Geniş Bantlı ve Düşük Frekanlı Mekanik Titreşimler İçin Esnek Piezoelektrik Enerji Hasadı Sistemi Tasarımı ve Üretimi. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Demir, F. (2017). Piezoelektrik Malzeme ile Rüzgardan Enerji Hasatı. Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Anabilim Dalı, Zonguldak.
- Doğanay, H., Coşkun, O. (2017). *Enerji Kaynakları. Pegem Akademi Yayınları*. Vadi Grup Ciltvi A.Ş., Ankara, 315s.
- Duran, K., Bahtiyari, M. İ., Körlü, A. E., Dereli, S., Özdemir, D. (2006). *Ultrason Teknolojisi. Tekstil Ve Konfeksiyon*, 16(3), 155-158.
- 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.

- Erickson, R. W., Maksimovic, D. (2007). *Fundamentals of power electronics (2nd ed)*. Springer Science & Business Media.
- Erturk, A. (2009). Electromechanical Modeling of Piezoelectric Energy Harvesters. Doctoral Dissertation, faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA.
- Ginart, A. (Ed.). (2019). Fault Diagnosis for Robust Inverter Power Drives. *Energy Engineering*. (Vol. 120).
- 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.
- Hummel, R. E. (2011). *Electronic Properties of Materials* (3rd ed.). New York , Springer New York.
- Işık, E., Ünal, O. (2020). Rüzgar Türbini Kanat Tasarımı ve Analizi. Makina Mekanik Tasarım Projesi, *Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi. Makina Mühendisliği Bölümü, Kocaeli*.
- Iyer, N.P.R. (2018). *Power Electronic Converters: Interactive Modelling Using Simulink*. London, New York : CRC Press.
- Jaffe, B., Cook, W., Jaffe, H. (1971). *Piezoelectric Ceramics*. Academic Press Inc, London.
- 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* 122 (2005) 16–22.
- Ju, S., Ji, C. H. (2018). Impact-Based Piezoelectric Vibration Energy Harvester. *Applied Energy*, 214, 139-151.
- Katzir, S. (2012). Who Knew Piezoelectricity? Rutherford and Langevin on Submarine Detection and The Invention of Sonar. *Notes and Records of the Royal Society*, 66, 141–157, (2).
- Kılıç, R., Aslan, V. (2017). Yenilenebilir ve 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.
- Köse, F., Özgören, M. (2005). Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Ölçümü ve Rüzgar Türbini Seçimi. *Mühendis ve Makine*, 551, 20-30.
- Luo, F. L., Ye, H., Rashid, M. H. (2010). *Digital power electronics and applications*. Elsevier.
- Mcgahey, C.S. (2009). Harnessing Nature's Timekeeper: a History of the Piezoelectric Quartz Crystal Technological Community (1880-1959). Doctoral Dissertation, Georgia Institute of Technology , The Academic Faculty.
- 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* 115 (2004) 523–529.

- Modi, V. J., Fernando, M. S. U. K. (1989). On The Performance of The Savonius Wind Tturbine. *Journal of Solar Energy Engineering*, 111(1), 71-81.
- Moheimani, S.O.R., Fleming, A.J. (2006). *Piezoelectric Transducers for Vibration Control and Damping*. Springer-Verlag London.
- Nakamura, K. (2012). *Ultrasonic Transducers: Materials and Design for Sensors, Actuators and Medical Applications*. Woodhead Publishing.
- Newman, B. G. (1974). Measurements on Savonius Rotor with Variable Gap. *Proceedings of the University of Sherbrook Conference on Wind Energy*, Sherbrooke, Quebec, Canada.
- Nurbay, N., Çınar, A. (2005). Rüzgar Türbinlerinin Çeşitleri ve 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. *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'13)*, RE&PQJ, Vol.1, ISSN 2172-038 X, No.11, March 2013, Bilbao (Spain).
- Özhan, D. (2019). Yeni Bir Piezoelektrik Rüzgar Enerjisi Hasatçısı Tasarımı ve Uygulaması. Doktora Tezi, Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Ensttütü, Şanlıurfa.
- Patel, I., Uzun, M. (2011). The Requirement for Piezoelectric Smart Material For Current and Future Applications. *Sigma*, 29, 395-411.
- Rashid, M. H., (2017). *Power electronics handbook* (4th ed). Butterworth-Heinemann.
- Reupke, P., Probert, S. D. (1991). Slatted-Blade Savonius Wind-Rotors. *Applied Energy*, 40(1), 65-75.
- Robiony, M., Franz, L., Costa, F., Bianchi, A., Marchetti, C. (2016). Piezosurgery: A True Revolution for Nasal Bone Osteotomies in Rhinoplasty. *Plastic and Reconstructive Surgery Global Open*, 4(6).
- Robiony, M., Polini, F., Costa, F., Vercellotti, T., Politi, M. (2004). Piezoelectric Bone Cutting in Multipiece Maxillary Osteotomies. *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 62(6), 759-761.
- 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 (2003) 1131–1144.
- Selek, H.S. (2012). Elektronik Davulun Eğitim Amaçlı Tasarımı ve Bir Müzik Eğitimi Simülatörü. Doctoral Dissertation, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- 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-S67.

- 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.
- Tan, Y.K., Panda, S.K. (2007). A Novel Piezoelectric Based Wind Energy Harvester for Low-Power Autonomous Wind Speed Sensor. *The 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*.
- Tani, J., Takagi, T., Qiu, J. (1998). Intelligent Material Systems: Application of Functional Materials. *Applied Mechanics Reviews*, 51(8), 505-521.
- Taş, S. (2019). Applications Of The Pressure Effect On The Electrical Energy: Piezoelectric Example. M.Sc. Thesis, Hasan Kalyoncu University, Graduate School of Natural & Applied Sciences.
- 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.
- Tressler, J. F., Alkoy, S., Newnham, R. E. (1998). Piezoelectric Sensors and Sensor Materials. *Journal of Electroceramics*, 2(4), 257–272.
- Türker, Ö. (2009). Pzt/Polimer Esaslı Aktif Titreşim Kontrolüne Uygun Akıllı Kiriş Tasarımı ve İmalatı. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- URL-1: https://www.alibaba.com/product-detail/High-performance-piezoelectric-actuatorspiezoelectricDriver_1600348872667.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_image.200922ffAYA7Gb&s=p. (Ziyaret Tarihi: 13 Ocak 2022).
- URL-2: <https://www.electrical4u.com/what-is-capacitor/>. Electrical 4U. (Ziyaret Tarihi: 21 Mart 2022).
- URL3: <https://www.americanpiezo.com/knowledgecenter/piezothory/piezoelectricity.html>. (Ziyaret Tarihi: 15 Kasım 2021).
- URL-4: <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Flex/MSI-techman.pdf>. (Ziyaret Tarihi: 10 Aralık 2021).
- URL-5: <https://electricalbaba.com/piezoelectric-transducer/>. (Ziyaret Tarihi: 16 Ocak 2022).
- URL-6: http://en.wikipedia.org/wiki/Lead_titanate#/media/File:Perovskite.svg. (Ziyaret Tarihi: 2 Ocak 2022).
- URL-7: <https://onscale.com/piezoelectricity/history-of-piezoelectricity/>. (Ziyaret Tarihi: 25 Kasım 2021).

- URL-8: <https://onscale.com/walter-guyton-cady-father-piezoelectricity/>. (Ziyaret Tarihi: 1 Aralık 2021).
- URL-9: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/understanding-and-modeling-piezoelectric-sensors/> (Ziyaret Tarihi: 16 Ocak 2022).
- Ushiyama, I., Nagai, H. (1988). Optimum design configurations and performance of Savonius rotors. *Wind Engineering*, 12(1), 59-75.
- Usta, O.G. (2019). Rüzgar Temelli Piezoelektrik Generatör Tasarımı ve Mppt ile Kontrolü. Yüksek Lisans Tezi, Ordu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ordu.
- Williams, C. B., Yates, R. B. (1995). Analysis of a Micro-Electric Generator for Microsystems. *The 8th International Conference on Solid-state Sensors and Actuators, and Eurosensors*, Stockholm, Sweden, June 25-29, 1995.



KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

KAREEM, T., Rüzgar Tahrikli Piezoelektrik Jeneratörleri Kullanarak Enerji Hasadı,
4th International Engineering Research Symposium (INERS'22), Düzce, Türkiye,
04-06 Mart 2022.



ÖZGEÇMİŞ

İlk okul, orta okul ve lise öğrenimimi Bağdat'ta tamalamıştım. 2015 yılında (Electromechanical Engineering) bölümünden Teknoloji Üniversitesinden mezun olmuşum, 2015 yılında Teknoloji Üniversitesi'nde öğrtmen olarak başlamıştım, 2019-2020 yılında Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği bölümü'nde yüksek lisansa başlamıştım.

