



**BİR PİEZOELEKTRİK RÜZGÂR ENERJİSİ HASATÇISI TASARIMI
VE UYGULAMASI**

Abdullah Cem DURMUŞ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK – ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ŞUBAT 2021

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak tarafımdan hazırlanan bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunulan veri, bilgi ve dokümanların akademik ve etik kurallar dahilinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, analiz ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun biçimde sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım bilimsel eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Elde edilen verilerde hiçbir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunulan çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

.....
Abdullah Cem DURMUŞ
10/02/2021

BİR PİEZOELEKTRİK RÜZGÂR ENERJİSİ HASATÇISI TASARIMI
VE UYGULAMASI
(Yüksek Lisans Tezi)

Abdullah Cem DURMUŞ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Şubat 2021

ÖZET

Bu çalışmada, titreşimlerden elektrik enerjisi üreten piezoelektrik levhalar kullanılarak bir sistem tasarımı yapılmış ve prototip üretilmiştir. Çalışma kapsamında, çeşitli piezoelektrik levhaların titreşim özellikleri incelenmiştir. 3 farklı uzunluğa ve doğal titreşim frekansına sahip piezoelektrik levhalarda 0.5 Hz'den 25 Hz'e kadar yapılan titreşim deneyleri ile bu levhaların doğal titreşim frekansları tespit edilmiştir. İlgili titreşim frekanslarında ne kadar elektriksel gerilim ve güç oluşturabildikleri ölçülmüştür. Deneyler sırasında farklı yüklerin, üretilen elektriksel güce etkileri de çalışılmıştır. Ayrıca çalışma kapsamında, prototip rüzgar enerjisi hasatçısının elektromanyetik analizleri de gerçekleştirilmiştir. Böylece; piezoelektrik levhalardan deneysel olarak elde edilen veriler ile, doğrudan enerji üreten bir sistemin tasarım ve imalatı sağlanmıştır. Doğada, rüzgâr hızı ve çeşitli etmenlerden kaynaklanan her türlü titreştirici kuvvet, doğal frekansta olmayıp gerçekte belli bir frekans aralığında sürekli değiştiğinden, bu durumda elde edilebilecek gücün artırılması ancak multifrekanslı bir yeni hasatçıyla mümkün olacaktır. Sonuç olarak daha geniş rüzgar hızı bandında, düşük rüzgar hızlarında enerji üretebilen yeni bir sistem üretilmiştir.

Bilim Kodu : 90544
Anahtar Kelimeler : Piezoelektrik, rüzgar enerjisi, elektrik enerjisi üretici, yenilenebilir enerji.
Sayfa Adedi : 79
Danışman : Prof. Dr. Erol KURT

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A PIEZOELECTRIC WIND ENERGY HARVESTER

(MSc Thesis)

Abdullah Cem DURMUŞ

GAZI UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

February 2021

ABSTRACT

In this study, a system design and prototype have been realized by using piezoelectric layers producing electrical energy from vibrations. In the study, the vibration properties of various piezoelectric layers have been explored. Natural vibration frequencies have been determined with the vibration experiments performed from 0.5 Hz to 25 Hz in piezoelectric layers with 3 different lengths and natural frequencies. How much electrical voltage and power they can generate at the respective vibration frequencies are measured. During the experiments, the effects of different loads on the generated electrical power have been studied, too. Within the scope of study, electromagnetic analysis of the prototype wind energy harvester has been also performed. Thereby; with the experimental data obtained from piezoelectric layers, the design and implementation of a direct energy generating system have been provided. In the nature, wind speed and all vibrational forces stem from various factors are not at natural frequency, indeed they vary continuously within a certain frequency interval, the increase of power can only be possible by a new multi-frequency harvester. To conclude, a new system which can generate energy at low wind speed and in wider wind speed band is implemented.

Science Code : 90544

Key Words : Piezoelectric, wind energy, electric energy harvester, newable energy.

Number Of Pages : 79

Thesis Manager : Prof. Dr. Erol KURT

TEŞEKKÜR

Ders dönemimde ve tez çalışmalarım süresince çok değerli katkılarını esirgemeyen, sürekli iletişim halinde kalan, deneyimlerini en açık hali ile paylaşan ve sorunlara farklı açılardan bakmamı sağlayan tez danışmanım Sn. Prof. Dr. Erol KURT Hocam'a teşekkürlerimi sunarım. Ders aldığım ve deneyimlerinden yararlandığım diğer tüm Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği bölümü hocalarıma ayrıca teşekkür ederim. Tez çalışmam süresince deneyimleri ile destek olan Sn. Doç. Dr. Yunus UZUN Hocam'a teşekkür ederim. Bu tez boyunca TÜBİTAK'ın ilgili proje desteği programından 114E017 nolu proje kapsamında destek alınmıştır. Bu sebepten TÜBİTAK'a da bu desteği için danışmanım Prof. Dr. Erol KURT ve şahsım adına teşekkür ederim. Son olarak, aileme teşekkürü borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. PİEZOELEKTRİK MALZEMELER.....	5
2.1. Piezoelektrik Malzemelerin Kullanım Alanları	6
2.2. Piezoelektrik Malzeme Çeşitleri	7
2.2.1. Tek kristalli yapıda piezoelektrik malzemeler	7
2.2.2. Çok kristalli yapıda piezoelektrik malzemeler	8
2.2.3. Polimer yapıda piezoelektrik malzemeler	8
2.2.4. Kompozit piezoelektrik malzemeler	8
2.3. Piezoelektrik Seramik Üretimi	8
2.4. Piezoelektrik Malzemelerin Elektromekanik Özellikleri	10
2.5. Piezoelektrik Malzemelerin Özelliklerinin Bozulması	12
2.5.1. Elektriksel bozulma.....	12
2.5.2. Mekanik bozulma.....	13
2.5.3. Sıcaklığa dayalı bozulma	13
2.6. Rezonans Frekansı.....	13

	Sayfa
2.7. Piezoelektrik Malzemelerin Genel Eşitlikleri	14
3. TEORİK ÇALIŞMALAR	17
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	25
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	63
KAYNAKLAR	65
EKLER	67
EK-1. Konferans Yayını: Power Characteristics of a New Contactless Piezoelectric Harvester.....	68
ÖZGEÇMİŞ	79

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Enerji üreteç devresi özellikleri	50
Çizelge 4.2. Sistemde kullanılan şarj edilebilir pilin özellikleri	58
Çizelge 4.3. Piezoelektrik rüzgar enerjisi üreticinin optimum çalışma parametreleri ...	60



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Piezoelektrik sistem ile üretilecek giriş sinyali şarj edilebilir pile depolama için devre şeması.....	7
Şekil 2.2. Piezoelektrik seramiklerin üretimi.....	9
Şekil 2.3. Elektrik alana bağlı olarak kutuplanma grafiği (Histerisiz eğrisi).....	10
Şekil 2.4. Elektrik alana (E) bağlı olarak cismin boyundaki uzamayı (S) gösteren grafik (Kelebek eğrisi)	11
Şekil 3.1. Piezoelektrik rüzgar üreticinin (a) ön yüz (b) yan yüz ve (c) genel çizimi.....	18
Şekil 3.2. Elektromanyetik sonlu elemanlar benzetimi: (a) Eksenel, (b) Yan, (c) Genel görünüm	20
Şekil 3.3. Elektromanyetik uyartım altında piezoelektrik levhanın modellenmesi	22
Şekil 4.1. Kullanılan piezoelektrik levha ve özellikleri	28
Şekil 4.2. Doğal frekans tespiti için kullanılan frekansa bağlı piezoelektriklerin titreşim genliği cevapları.....	30
Şekil 4.3. Maksimum gerilimin frekansa bağlı değişimi	31
Şekil 4.4. Piezoelektrik etkinin frekans değişimine bağlı olarak eldesi	32
Şekil 4.5. Üç farklı uzunluktaki levhaların, serbest salınım altında 360 Kohm bağlı elektriksel yükten elde edilen maksimum güçleri	33
Şekil 4.6. Gerilimin omik yüke göre değişimi	34
Şekil 4.7. Omik yüke göre güç değişimi	34
Şekil 4.8. Rüzgâr tünelinin akış özelliği	38
Şekil 4.9. Rüzgâr hızı ile türbin açıl dönmesi arasındaki ilişki	39
Şekil 4.10. Rüzgâr tüneli denemelerinde üç piezoelektrik levhadan alınan gerilimler ..	40
Şekil 4.11. Rüzgâr tüneli denemelerinde üç piezoelektrik levhadan alınan gerilimler ..	41
Şekil 4.12. Üç piezoelektrik levhanın rüzgâr hızlarına göre ürettiği maksimum açık uç gerilimleri	42
Şekil 4.13. Üç piezoelektrik levhanın rüzgar hızlarına göre ürettiği maksimum gerilimler, 360 Kohm yük için.	43

Şekil	Sayfa
Şekil 4.14. Rüzgar hızına göre levhalarda elde edilen güçler ve toplam güç	44
Şekil 4.15. Üç piezoelektrik levhadan üretilen çıkış sinyalleri.....	45
Şekil 4.16. Üç piezoelektrik levha çıkışı için kontrolsüz doğrultucu	45
Şekil 4.17. LM317 entegresi ile dc/dc dönüştürücü diyagramı ve pin isimleri	46
Şekil 4.18. Proteus programında gerçekleştirilen doğrultucu ve DC-DC dönüştürücü devre.....	47
Şekil 4.19. Proteus programında gerçekleştirilen doğrultucu ve DC-DC dönüştürücü devre.....	47
Şekil 4.20. Enerji kontrol devresi devre şeması.....	49
Şekil 4.21. Zamana bağlı olarak farklı yükler için enerji üreteç devresinin kondansatör ve çıkış gerilimleri.....	51
Şekil 4.22. Yüke bağlı gerilimlerin ve güç değerlerinin ticari üreteç devresi çıkışından eldesi	55
Şekil 4.23. Çıkışa yük bağlı iken (a) akım ve (b) çıkış güç değerlerinin dc-dc doğrultucu devresi çıkışından eldesi.....	57

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. Deneysel düzenek	25
Resim 4.2. Piezoelektrik doğal frekans tespit deneyi: (a) Titreştirici ve test edilen piezoelektrik levha lazer yer değiştirme sensörü ile. (b) LabView ara yüzüne sensörden gelen verilerin kaydı	27
Resim 4.3. Temassız piezoelektrik rüzgâr üretici: (a) Genel görünüm, (b) piezoelektrik ünitenin görünümü	35
Resim 4.4. Temassız piezoelektrik rüzgâr enerjisi üreticinin rüzgâr tüneli testi	37
Resim 4.5. Rüzgâr tünelinin genel görünümü.....	37
Resim 4.6. Üç piezoelektrik levha çıkışı için kontrolsüz doğrultucu ünitesi uygulaması.	48
Resim 4.7. Enerji kontrol devresi	49
Resim 4.8 Piezoelektrik rüzgâr enerjisi hasatçısının mekanik ve elektronik üniteleri toplu halde.....	53
Resim 4.9. Doğrultulmuş faz sinyali.....	54
Resim 4.10. Yük çıkışının sayısal multimetre çıkışından gözlenmesi.....	54
Resim 4.11. 3 faz doğrultucu, ticari dönüştürücü ve pil ile beraber elektronik sistemin genel görünümü ve ticari üreteç yerine bizim yaptığımız DC-DC dönüştürücü kullanılan deney görünümü	56
Resim 4.12. Sistemin saha şartlarında test edilmesi.	59
Resim 4.13. Rüzgâr hızının 3.4 m/s'den büyük olduğunda piezoelektrik levhada oluşan kırılma	60
Resim 4.14. Manyetik etki altına çalışan kırılmamış ve mekanik temasla kırılan piezoelektrik parçaların durumları.....	61

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
P	Güç
V_{pp}	Bir sinyalin alt ve üst tepeleri arasındaki gerilim
V	Gerilim
ϵ_0	Boşluğun dielektrik sabiti
C	Kondansatör
ϵ^T	Piezoelektrik malzemenin dielektrik katsayısı
T	Mekanik basınç
R_L	Yük direnci
Y	Elastikiyet katsayısı (Young modülü)
E	Elektrik alan
D	Elektrik akı yoğunluğu
S	Gerilme miktarı
k	Elektromanyetik etkileşim faktörü
s^E	Dielektrik sabiti
d_{33}	Piezoelektrik sabiti
D	Diyot
Q	Kondansatör kapasitesi
$^{\circ}C$	Derece santigrat
B	Manyetik alan

Kısaltmalar	Açıklama
AA	Alternatif akım
BaTiO ₃	Baryum Titanat
DA	Doğru akım
PbO	Kurşun monoksit

Kısaltmalar**Açıklama****PbNb₂O₆**

Metaniyobat

Pb[Ti,Zr]O₃

Kurşun Zirkonat Titanat

TiO₂

Titanyum Dioksit

ZrO₂

Zirkonyum dioksit



1. GİRİŞ

Piezoelektrik malzemeler, levhalara basınç uygulanması durumunda, malzemenin terminalleri arasında elektriksel potansiyel oluşturan malzemelerdir. Benzer şekilde artı ve eksi uçlarına gerilim uygulanması ile de mekanik olarak esneme eğilimi gösterirler. Ancak akımın belirli bir değerin üzerinde olması gereklidir. Doğada; rüzgar, deniz dalgası gibi doğal etkiler veya insan kaynaklı mekanik hareketler kullanılarak enerji üretimi amacıyla piezoelektrik yerleşik modeller tasarlanmaktadır.

Teknoloji ile birlikte birçok alanda kullanılmaya başlanan kablosuz sensörlerin enerjileri genel olarak pillerden sağlanır. Pillerin belirli bir kullanım süresi olması nedeniyle belirli aralıklarla değiştirilmeleri veya şarj edilmeleri zorunludur. Kablosuz sensörler ise bazı durumlarda erişilmesi zor alanlarda yer almaktadır. Bu durum pillerin değiştirilmesini veya şarj edilmesini zorlaştırmakta hatta bazen imkânsız hale getirmektedir. Bu durumda pillere ek olarak bazı doğal enerji elde etme metotlarının da kullanılması gerekmektedir. Son yıllarda piezoelektrik malzemeleri kullanarak enerji üreten sistemlerle ilgili çalışmalarda büyük artış gözlenmiştir. İlaveten yurdumuzun geleneksel enerji kaynakları bakımından dış ülkelere bağımlı olması “enerji çalışmalarını” desteklenecek öncelikli alanlardan biri yapmıştır. Piezoelektrik levhalar yardımıyla doğal titreşimlerden yararlanarak elektrik enerjisi üretimi temiz ve sürdürülebilirdir. Literatürdeki pek çok çalışma piezoelektriklerle yapılan sistemlerin, piezoelektrik levhanın doğal titreşim frekansı civarında maksimum enerji verdiğini ortaya koymuştur.

Temassız bir kuvvet uygulama metodu olan manyetik uyarma ile piezoelektrik levhalar sürtünmesiz olarak çalıştırılabilir. Bu yöntem, levhaların kullanım ömrünün artırılması yönünde pozitif etki gösterecektir. Ayrıca bir piezoelektrik üreticinin yüzey alanı başına elde edilebilen güç yoğunluğunun genellikle 40 mW/m^2 mertebelerindeyken kablosuz bir sensörün ise güç gereksiniminin 100 mW civarında olduğu da bilinmektedir [1-3]. Bu nedenle, piezoelektrik yapılarından elde edilebilecek maksimum gücün yüzey alanıyla orantılı artacağı aşîkârdır. Ancak bu faktörün dışında üretilen gücü yükseltmede başka parametreler de rol oynamaktadır.

Örneğin bazı sürekli mıknatıslı piezoelektrik sistemlerde doğrusal-olmamaya sebep olan çift-kararlı (bistable) potansiyellerin de enerji üretiminde avantaj sağladığı görülmüştür.

Ancak bu türden sistemler de enerji üretimi açısından piezoelektrik levhanın doğal frekansına bağımlılık sergilemektedir. Piezoelektrik hasatçının salınımı doğal frekanstan uzaklaştığında, sistemden elde edilen gücün düşeceği aşîkârdır. Bu sebeple, piezoelektrik sistemlerde daha geniş bir doğal frekans aralığında çalışan bir model tasarımına ihtiyaç vardır. Piezoelektrik hasatçıların diğêr önemli özelliğı ise çok düşük dış kuvvetlerle bu levhaların harekete geçirilebilmesidir. Bu sayede piezoelektriklerde üretilen güç geleneksel üreteçlerden çok az olmasına rağmen daha düşük hızlarda da işlevsel olduğundan daha sürekli dir. Diğêr yandan düşük güçlü bu türden sistemler meteoroloji istasyonlarında ve ulaşîma ve şebekeye uzak kablolu veri aktaran sistemlerde çok yaygın kullanım alanı bulunmaktadır. Şebeke gerilimi sağlanamayan bazı bölgelere ulaşîm çok zor olabilir. Bu durumda sistemlerin kendi enerjisini üretebilmesi için alternatif bir sistem olarak piezoelektrik malzemeler kullanılabilir.

Piezoelektrik malzemeler alternatif akım üretmektedir. Titreşîm şiddetine ve frekansına bağılı olarak sinüzoidal sinyale benzer bir gerilim oluşturlar. Bu gerilimi depolamak ve sonrasında enerji ihtiyacı olan sistemlerde kullanabilmek için doğrultucu bir devre aracılığı ile doğru akîma çevirmek gerekir. Doğrultulan gerilim, yükün besleneceğı gerilimden düşük seviyelerde olabilir. Bu sebeple DC – DC dönüştürücü bir devre aracılığı ile istenen seviyeye yükseltilerek ve şarj edilebilir pile depolanarak kullanîma hazır hale getirilir [4-7].

Literatürde, Cottone ve arkadaşlarının yaptığı deneysel çalışîma ile sarkaç sistemine bağlanan piezoelektrik sistem ile malzemenin titreştirilmesi sağlanmış ve enerji üretilmiştir [8]. Challa ve arkadaşları, bir piezoelektrik malzemeyi salınım yaptırırken, elektromanyetik bir düzenek ile salınım şiddetini arttırarak sistem çıkışında alınan gücün %30 arttığını gözlemlemişlerdir [9]. Ferrari ve arkadaşları da yine benzer bir çalışîma ile piezoelektrik malzemenin salınım şiddetini mıknatıs kullanarak arttırmış ve çıkış gücüne olumlu etkisi olduğunu ispatlamıştır [10]. Liang ve arkadaşlarının çalışîmasında ise piezoelektrik malzemenin salınımını daha şiddetli hale getirmek için bir bobinin belirlenen frekansta şarj – deşarj edilerek oluşan elektrik alan ile mekanik hareket desteğı sağlanmış tır [11]. Li ve arkadaşları, tamamen doğal bir ortam uygulaması deneyerek ince bir levhadan yaprak görünümünde bir piezoelektrik malzeme modelleyerek doğada elektrik üretimi yapmışlardır [12].

Literatür taramasında görülmüştür ki piezoelektrik malzemeler, düşük akım üretimi özelliğı sebebiyle genelde sensör gibi düşük ve sürekli güç tüketimi yapan ünitelerin besleme

sistemleri için kullanılmıştır. Bu tezde işlenen konu, diğer araştırmalardan farklı olarak çoklu bir piezoelektrik sistemi kurmayı ve bu sayede de daha geniş bir rüzgar hızı bandını verimli kullanmayı hedeflemiştir.





2. PİEZOELEKTRİK MALZEMELER

Piezo, aslen Yunanca'da sıkıştırmak, fiziksel baskı uygulamak anlamlarına gelmektedir. René Just Haüy ve Antoine César Becquerel, 18. Yüzyılda malzemelerin sıcaklık, basınç gibi mekanik etkiler altında elektriksel yük durumunun değişimi hakkında çalışmalar yapmıştır [13]. Bu iki araştırmacı, malzemenin elektrik yükünün mekanik basınç ile değiştiğini öne sürdüler ancak bu sav ispat edilemedi. İlk piezoelektrik malzeme keşfini Pierre Curie ve Jacques Curie yapmıştır. 1880 yılında yapılan bu çalışmada tuz kristalleri ile denemeler yapılmıştır. Kristallere uygulanan fiziksel kuvvet ile tuzlarda artı ve eksi kutuplanmalar olduğu ispatlanmıştır. Deneyler sonucunda Quartz ve Rochelle tuzunda en yüksek piezoelektrik özelliğin bulunduğu tespit edilmiştir. 1881 yılında, Gabriel Lippman tarafından yapılan çalışmalarda, piezoelektrik malzemeye gerilim uygulanması ile fiziksel hareket olduğu görülmüş ve ters piezoelektrik özellik olarak adlandırılmıştır [14,15]. Pierre Curie ve Jackies Curie bu durumun varlığını teyit etmişlerdir. Akabinde, piezoelektrik etki ile ters piezolektrik etkide oluşan fiziksel ve elektriksel güç büyüklükleri eşit ölçülmüştür. Bu durum, piezoelektrik malzemelerin popüler hale gelmesini sağlasa da 1900'lü yıllara kadar pratik uygulamalara geçilememiştir. 1900'lü yıllarda ise piezoelektrik malzemelerin popülerliği tekrar artmıştır ve 1. Dünya Savaşı'nın da başlamasıyla savunma alanında bazı denemeler yapılmıştır. 1917 yılında Fransız Paul Langevin tarafından, piezoelektrik malzeme kullanılarak denizaltı algılayıcı yapılmıştır. Deniz altında bulunan piezoelektrik levhaların titreştirilmesi ile oluşturulan çok yüksek frekansa sahip ses sinyalinin, uzaktaki cisimlerden yansiyarak geri dönen ses dalgaları aynı malzeme ile algılanarak geçen süre ile uzaklık bilgisine ulaşılmaktaydı. Deniz altı cisimler, derinlik, diğer deniz araçlarının tespiti gibi alanlarda mesafe ölçümü yapılmaktaydı. Sonraki yıllarda da sonar sistemlerde çok hassas piezoelektrik malzemeler kullanılarak deniz altında mesafe tespiti için farklı uygulamalar yapılmış ve kullanılmıştır [16].

1940'lı yıllardaki çalışmalarda Baryum Titanat (BaTiO_3) bileşiğinin piezoelektrik özelliği farkedildi ancak 120 °C'den sonra bu özellikler kaybolmaktaydı. Yüksek sıcaklıklarda özellikleri bozulmayan Metaniyobat (PbNb_2O_6) ve Kurşun Zirkonat Titanat ($\text{Pb}[\text{Ti},\text{Zr}]\text{O}_3$) keşfedildikten sonra 250 °C'ye kadar stabil özellik gösteren bu iki madde kullanılmaya başlandı [17]. Halen, en çok tercih edilen piezoelektrik malzemelerden ikisi olarak

kullanılmaktadır. Bu iki malzemenin uygun fiyatlı olması sebebiyle bir çok piezoelektrik sistem uygulamasında kullanımı sürmektedir.

2.1. Piezoelektrik Malzemelerin Kullanım Alanları

Piezoelektrik malzemeler hem piezoelektrik hem ters piezoelektrik özelliğe ihtiyaç duyulan bir çok sistemde kullanılmaktadır. Seslendirme sistemleri başta olmak üzere ses şiddetinin algılanması gereken sistemlerin çoğunda piezoelektrik malzemelerden imal edilen mikrofonlar kullanılmaktadır [16]. Deniz altında ölçüm yapmaya yarayan sonar sistemlerde yine piezoelektrik özellikten yararlanılır. Bu sistemlerde, piezoelektrik malzemedan yayınlanan ses; bir cisimden, deniz dibinden veya deniz yüzeyinden yaptığı yansıma ile geri döner ve ters özellikle algılanır. Bu yöntem sayesinde uzaklık ölçümü yapılmış olur.

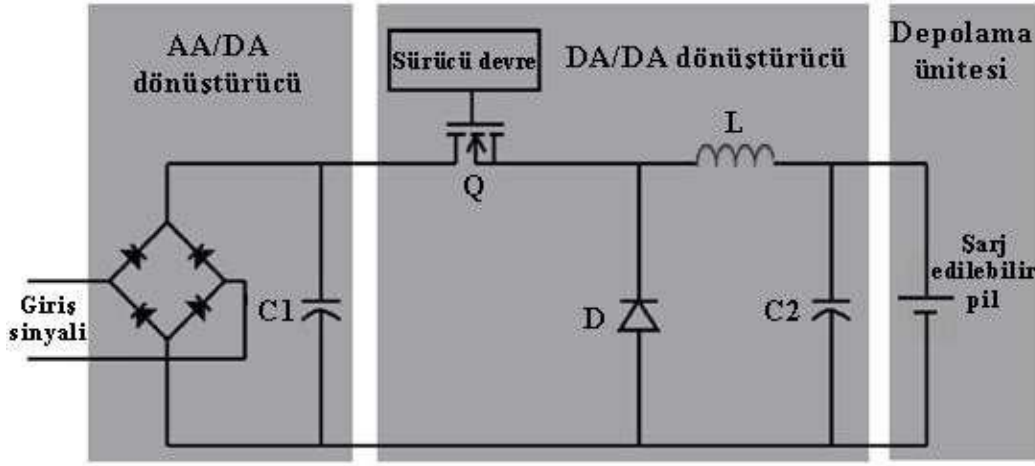
Güncel teknolojilerle yapılan köprülerde, (örneğin, Yavuz Sultan Selim Köprüsü ve Çanakkale Köprüsü) köprünün sağlığının izlenmesi amacıyla vibrasyon ve burkulmanın izlendiği sistemlerde piezoelektrik malzemelerden faydalanılmaktadır.

Titreşimin istenmediği hareketli alanlarda, piezoelektrik malzemelere uygulanan gerilim ile titreşim azaltılmaktadır. Özellikle uçaklarda, yıpranma süresini uzatmak adına piezoelektrik levhalar kullanılmaktadır [22].

Dizel araçların enjektör sisteminde yakıtın çok küçük zerrecikler halinde püskürtülmesi için piezoelektrik malzemelerden faydalanılır. Bu sistem sayesinde yakıt ve hava karışımı, araç motor bloğundaki yanma odasına geniş bir hacimde püskürtülür ve maksimum yanma elde edilmiş olur [23].

Ateşleme sistemlerinin bir çoğunda piezoelektrik malzemelerden faydalanılır. Birbirine sürtüldüğünde kıvılcım çıkartan iki maddenin piezoelektrik plakalara bağlanması ile, bu sisteme gerilim uygulandığında kıvılcım çıkarıp ateşleme sağlanmaktadır.

Sensör ve düşük güç tüketimi olan elektronik sistemlerin beslemesinde piezoelektrik malzemeler kullanılmaktadır. Hem doğal yollarla, hem insan etkeni olan dolaylı sebeplerle birçok alanda hareket mevcuttur. Bu hareketlere entegre edilebilen piezoelektrik sistemler ile enerji üretimi ve depolanması mümkündür.



Şekil 2.1. Piezoelektrik sistem ile üretilecek giriş sinyalini şarj edilebilir pile depolama için devre şeması [20]

Şekil 2.1’de görüldüğü üzere, piezoelektrik malzemenin ürettiği gerilimi depolamak için bir devre şeması tasarlanabilir. Piezoelektrik malzeme sürekli titreşmenin etkisiyle alternatif gerilim üretecektir. İlk olarak bu gerilimin doğrultulması gereklidir. Akabinde, doğrultulan çok düşük seviyedeki gerilimin kullanılabilir seviyede yükseltilmesi gereklidir. Yükseltilecek gerilim, devre çıkışına bağlanacak uygun bir akım – gerilim değerine sahip bataryanın şarj edilmesinde kullanılacaktır.

2.2. Piezoelektrik Malzeme Çeşitleri

Piezoelektrik malzemeler farklı hammaddelerden üretilmektedir. Farklı hammaddeler ile üretilen piezoelektrik malzemeler; hammadde yapısı, üretim yöntemi, fiziki şekilleri gibi özelliklerine göre farklı mekanik gerilme ve piezoelektrik davranış sergilemektedir. İhtiyaca göre seçilecek piezoelektrik malzemede bu özellikleri göz önünde bulundurmak gerekmektedir.

2.2.1. Tek kristalli yapıda piezoelektrik malzemeler

En ilkel malzeme tipi olan tek kristalli piezoelektrik malzemeler, uygun fiyatları ve kolay bulunabilir olması sebebiyle akustik devrelerde ve salıncı imalatında kullanımına devam edilmektedir [18]. Bu malzemeler, kuvars, lityum tantalat ve lityum niyobat’tır. Bir başka özelliği ise kararlı yapıda olmalarıdır. Bu sebeple daha uzun kullanım ömrü sunarlar.

2.2.2. Çok kristalli yapıda piezoelektrik malzemeler

Yüksek sıcaklıklarda kullanım imkanı sunan çok kristalli yapıdaki Kurşun Zirkonat Titanat, yapısında kurşun içermesi sebebiyle sağlığa zararlı olduğu için bu yapıda alternatif piezoelektrik malzemeler araştırılmıştır [18]. Alternatif olarak kullanılabilen Baryum Titanat kurşun içermemekte ancak 70 °C'nin üzerinde yapısının bozulması sebebiyle yüksek sıcaklıktaki uygulamalarda ihtiyacı karşılamamaktadır. Dolayısıyla alternatif yapıdaki malzeme arayışları sürmektedir.

2.2.3. Polimer yapıda piezoelektrik malzemeler

Polimer malzemeler, diğer piezoelektrik malzeme hammaddelerine göre daha esnek ve dayanıklı olmaları sebebiyle hassasiyetin zayıf olduğu uygulamalarda tercih edilir. Örneğin, enerji üretebilen ayakkabı modellerinde polimer Piezoelektrik malzemeler kullanılmaktadır. Yaygın olarak kullanılan hammadde Poliviniliden Florür'dür. Oldukça hafif ve esnek bir malzemedir. Ancak yüksek kullanım sıcaklıklarında yine yapıları bozulmaktadır. Deniz altı ses ve yön belirleme uygulamalarında sıkça kullanımına rastlanmaktadır.

2.2.4. Kompozit piezoelektrik malzemeler

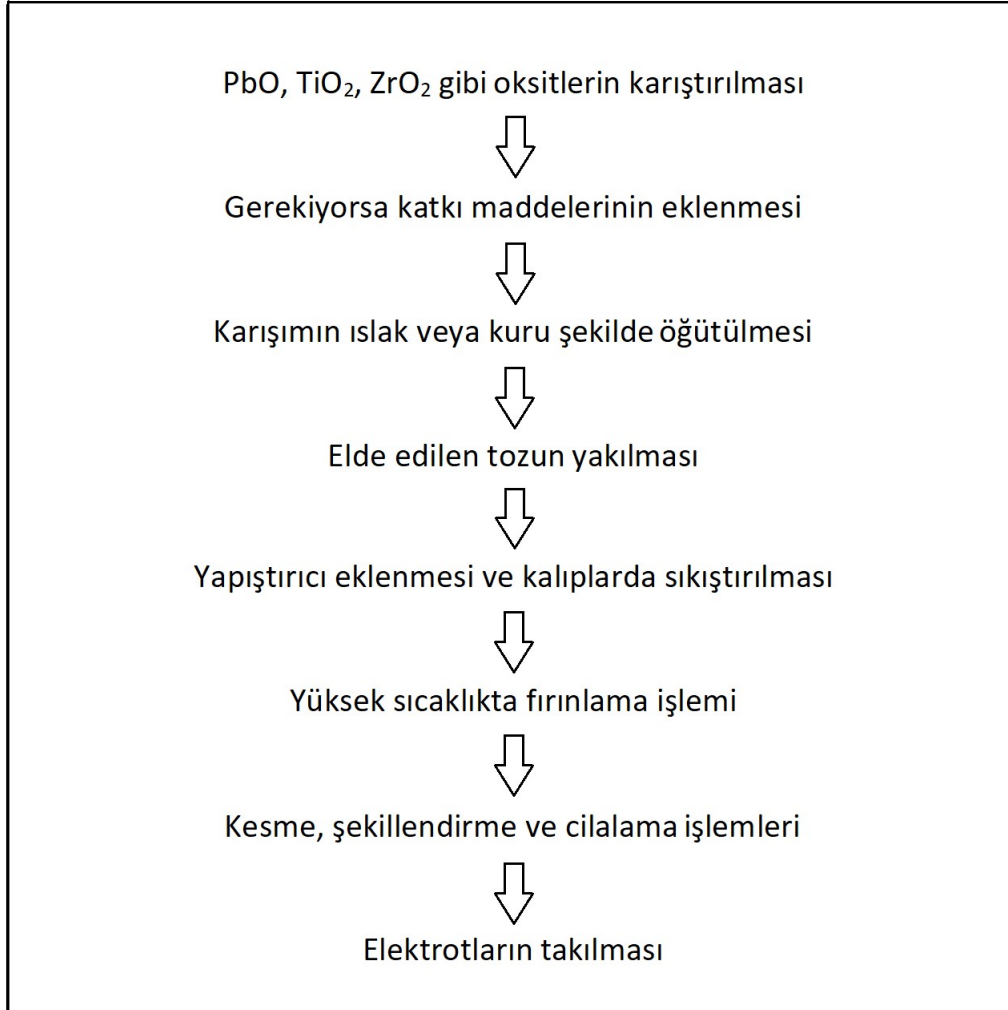
Kompozit malzemeler bir çok imalatda kullanıldığı gibi piezoelektrik malzeme imalatında da kullanılmaktadır. Piezoelektrik seramik malzemenin pasif bir polimer ile bir araya getirilmesi ile elde edilir. Yüksek mekanik esnekliğe sahip olması sebebiyle tercih edilir. Ayrıca, akustik empedansları oldukça düşüktür. Esnek yapıları sayesinde bir çok alanda tercih edilir. Polimer malzemeler gibi enerji üreten giysi imalatında, deniz altı uygulamalarda, bozuk zemine montaj yapılmak istenen alanlarda tercih edilir.

2.3. Piezoelektrik Seramik Üretimi

Piezoelektrik seramik üretimi için ilk önce çeşitli metal oksit malzemelerin belirli oranda karışımı ile toz hazırlama aşaması tamamlanır. Örnek olarak Kurşun Zirkonat Titanat üretimi için toz hazırlanırken Titanyum Oksit, Kurşun Oksit ve Zirkonyum Oksit kullanılır. Oksitler kuru halde öğütme veya ıslak halde öğütme yöntemleri ile karıştırılabilir. Islak halde öğütme

yapıldığında ortamdaki sıvı sebebiyle karışma daha hızlı olur ancak ortamdaki sıvının yok edilmesi için bir aşamaya daha ihtiyaç vardır. Bu da hem ilave işlem maliyetine hem zaman kaybına sebep olmaktadır.

Piezoelektrik seramik üretimi için uygulanan işlemleri diagram halinde göstermek gerekirse aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:



Şekil 2.2. Piezoelektrik Seramiklerin Üretimi [20]

Şekil 2.2’de gösterildiği üzere, oluşturulan toz halindeki karışım ikinci aşamada yakılır. Bu aşamada karıştırma sırasında ortamda bulunan sıvı ve diğer istenmeyen maddelerin yok edilmesi sağlanır. Sonraki aşamada ise karışıma uygun bir yapıştırıcı eklenir. Bir sonraki aşamada yapıştırıcılı toz karışım kalıba alınır ve uygun şekilde sıkıştırılarak istenen fiziki form verilmiş olur. Genellikle çubuk, disk veya levha gibi şekillerde kalıplar kullanılır. Devamında, yapıştırıcının fazlası yakılır. Bu aşamada fırın sıcaklığı 800 °C civarı olacağı

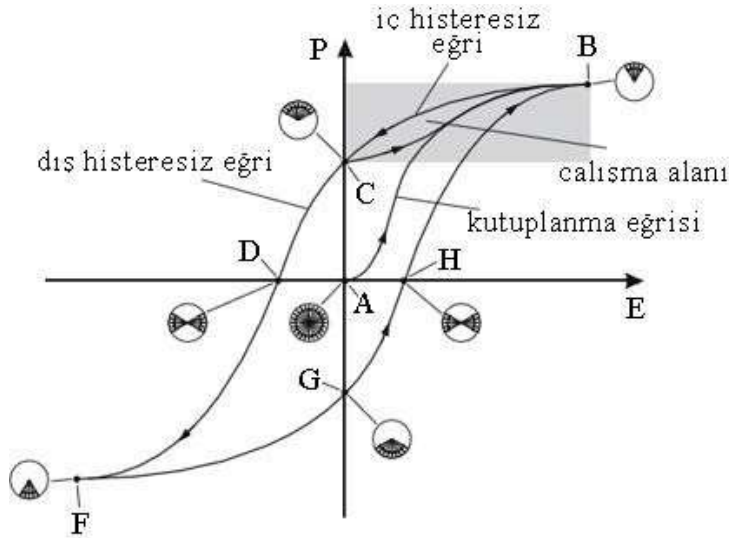
için Kurşun Oksit gaz formuna dönüşerek uçmak ister. Bunu engellemek için yakma işlemi Kurşun Zirkonat fırınlarda yapılır [18]. Ortam kurşun açısından doygun olduğunda Kurşun Oksit'in gaz formuna dönüşmesi zorlaşmaktadır. Bu sayede ortamdaki kaybolan Kurşun Oksit miktarı minimuma indirilmiş olur. Son aşamada soğumaya bırakılan malzeme istenen özelliklere şekillendirilerek elektrotlar montajlanır ve kullanıma hazır hale gelir.

2.4. Piezoelektrik Malzemelerin Elektromekanik Özellikleri

Bazı malzemelerin elektriksel özellikleri ferromanyetik malzemelerin manyetik davranışları ile benzer özellik gösterir. Bu tür malzemeler Ferroelektrik Malzeme olarak da adlandırılır. Ferroelektrik malzemelerin ferromanyetik malzemeler ile benzer özellikleri aşağıdaki şekildedir:

- Kutuplanmaları histeresiz özelliği gösterir,
- Dielektrik sabitleri her ikisinin de yüksektir,
- Dielektrik sabitleri sıcaklığa bağlı değişim gösterir.

Piezoelektrik malzemelerin kutuplanma eğrisi aşağıdaki şekilde gösterilmiştir :



Şekil 2.3. Elektrik alana bağlı olarak kutuplanma grafiği (Histerisiz eğrisi) [19]

Şekil 2.3'te başlangıçta kutuplanmamış bir malzeme, Curie sıcaklığının biraz altında, artan bir elektrik alana maruz kaldığında elektrik dipoller yönlenmeye başlar ve eğride görüldüğü gibi kutuplanma artar. Elektrik alan belli bir değerin üzerine çıktığında artık kutuplanmada

Şekil 2.4’de malzeme boyunda meydana gelen değişim ile elektrik alan arasındaki ilişki grafiği verilmiştir. Bu eğriye *kelebek eğrisi* denir. Şekil 2.3 ‘te olduğu gibi bu eğri de histerisiz etkisini göstermektedir. Elektrik alanın artışı, malzeme boyunu bir noktaya kadar değiştirmektedir; devamında malzeme boyu sabit kalmaktadır. Bu noktaya doyum noktası adı verilir. Bu noktadan sonra, elektrik alan sıfıra getirilse dahi malzemenin boyu, ilk haline dönmeyecektir. Bu durum da kalıcı uzama olarak adlandırılır. Eğer malzeme boyunun ilk haline dönmesi isteniyorsa ters yönde elektrik alan uygulanması gereklidir. Bu etkiyi sağlamak için uygulanan elektrik alana ise giderici elektrik alan adı verilir.

2.5. Piezoelektrik Malzemelerin Özelliklerinin Bozulması

Piezoelektrik malzemelerin çoğu özellikleri kutuplanma işleminden sonra zamanla şekilde yavaş yavaş bozulur. Malzemenin özelliklerini kaybetme oranı, yapısına ve hazırlanırken uygulanan üretim işlemine bağlıdır [20]. Malzemenin özelliklerini kaybetmesini (eskime) hızlandıran temel faktörler şunlardır:

- Yüksek mekanik basınç,
- Kutuplanmaya zıt, yönde kuvvetli elektrik alan,
- Curie sıcaklığına yaklaşan yüksek sıcaklık.

Piezoelektrik malzemenin bir takım özelliklerinin zamanla ne oranda değiştiğini ortaya koyan katsayıya eskime oranı denir. Eskime oranı aşağıdaki şekilde bulunur:

$$\text{Eskime oranı} = \frac{1}{(\log(t_2) - \log(t_1))} \left(\frac{P_2 - P_1}{P_1} \right) \quad (3.25)$$

Burada, t_1 ve t_2 kutuplanmadan sonra geçen gün sayısı, P_1 ve P_2 ise ölçülen ilgili değerlerdir.

2.5.1. Elektriksel bozulma

Piezoelektrik malzemeye normal kutuplanmasına ters yönde kuvvetli bir elektrik alan uygulandığında kutuplanma bozulacaktır. Kutuplanmanın bozulma derecesi malzemenin cinsine, elektrik alana maruz kalma süresine, sıcaklığa ve diğer faktörlere bağlıdır.

Uygulanan elektrik alan 200–500 V/mm veya daha büyük olduğunda kutuplanma önemli ölçüde bozulur [21]. Alternatif akım da kutuplanma yönü ile ters olan her yarım periyotta kutuplanmaya bozucu etki yapacaktır.

2.5.2. Mekanik bozulma

Bir piezoelektrik malzemede domainlerin yönlenmesini bozabilecek büyüklükte bir mekanik basınç, dipollerin yönlenmesini tahrip edebilir. Malzemenin cinsi ve uygulanan basıncın süresi mekanik dayanıklılığı etkileyen önemli faktörlerdendir. Bu yüzden piezoelektrik malzemeler harici mekanik etkilerden mümkün olduğunca korunmalıdır.

2.5.3. Sıcaklığa dayalı bozulma

Bir piezoelektrik seramik malzeme Curie sıcaklığına kadar ısıtılırsa domainlerin yönlenmesinde karışıklık meydana gelir ve malzemenin kutuplanması bozulur. Seramik malzemeler için tavsiye edilen üst çalışma sıcaklığı genellikle 0 °C ile Curie sıcaklığı arasındadır. Tavsiye edilen çalışma sıcaklığı aralığında, sıcaklık değişimleri domainlerin yönlenmesini tersine çevirebilir. Yani bu değişimler yük ve elektrik alan oluşturabilir. Hatta ani sıcaklık değişimleri, malzemenin kutuplanmasını bozabilecek yüksek gerilimlerin de oluşmasına yol açabilir. Bu durumda oluşacak fazla enerjiyi alması için sisteme bir kondansatör eklenebilir.

2.6. Rezonans Frekansı

Bir piezoelektrik malzeme, alternatif bir elektrik alana maruz kalırsa, boyutları alan ile aynı frekansta periyodik olarak değişir. Malzemenin uygulanan elektrik sinyaline en iyi tepki verdiği öyle bir frekans değeri vardır ki, bu değerde uygulanan elektrik enerjisi en verimli şekilde mekanik enerjiye dönüşür. Bu frekans değerine “rezonans frekansı” denir. Bu frekansın değeri seramik malzemenin yapısına, şekline ve hacmine bağlıdır. Rezonans frekansında empedans minimumdur. Frekans artırılırsa empedans artarak maksimum olur. Empedansın maksimum olduğu bu frekans değerine “ters rezonans frekansı” denir. Minimum ve maksimum empedans değerleri, piezoelektrik malzemenin elektrik enerjisini mekanik enerjiye veya mekanik enerjiyi elektrik enerjisine ne oranda dönüştürebildiğinin göstergesi olan elektromekanik etkileşim faktörü k 'nın hesaplanmasında kullanılır. k ,

titreşimin moduna ve seramik malzemenin şekline bağlıdır. Dielektrik ve mekanik kayıplar da enerji dönüşüm verimliliğini etkiler. Dielektrik kayıplar genellikle mekanik kayıplardan daha önemlidir.

2.7. Piezoelektrik Malzemelerin Genel Eşitlikleri

Bu bölümde tek boyutlu piezoelektrik malzemenin yapılmış bir dönüştürücü temel eşitliklerle incelenecektir. Elektrik akı yoğunluğu (D), Elektrik alan (E), basınç (T) ve gerilme (S) arasındaki ilişki aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$D = \varepsilon^T E + d_{33} T \quad (3.26)$$

$$S = d_{33} E + s^E T \quad (3.27)$$

Burada, D , piezoelektrik etki tarafından oluşturulan, birim alandaki elektrik akı yoğunluğu olup birimi Coulomb/m² dir. E , elektrik alan (V/m), T , basınç (N/m²), S , gerilmedir. ε^T , sabit basınç altındaki dielektrik sabiti, s^E , elektrik alan sabit iken yumuşaklık katsayısı (Young katsayısının tersi), d_{33} , piezoelektrik sabitidir (m/V veya Coulomb/Newton).

Eş. 3.26 ve 3.27 matris formunda aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\begin{bmatrix} D \\ S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon^T & d_{33} \\ d_{33} & s^E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E \\ T \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

Burada E ve T bağımsız, D ve S ise bağımlı değişkenlerdir. Eğer E ve S bağımsız değişkenler olarak alınırsa Eş. 3.26 ve 3.27 aşağıdaki şekilde yeniden yazılabilir;

$$D = \frac{d_{33}}{s^E} S + \varepsilon^T \left(1 - \frac{d_{33}}{s^E \varepsilon^T} \right) E \quad (3.29)$$

$$T = \frac{1}{s^E} S - \frac{d_{33}}{s^E} E \quad (3.30)$$

Yine Eş. 3.29 ve 3.30 matris formunda aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\begin{bmatrix} D \\ T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon^T (1 - k^2) & e_{33} \\ -e_{33} & c^E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E \\ S \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

Burada, $c^E = 1/s^E$, $E=0$ iken yani terminaller kısa devre edildiği durumdaki Young modülüdür. Birimi N/m^2 (Pascal) 'dir. $e_{33} = d_{33}/s^E$, elektrotların kısa devre edildiği durumdaki elektriksel bir sabit olup birimi Coulomb/m^2 'dir. Elastikiyet katsayısı Young, Y ile gösterilir.

k ise önceden belirtildiği gibi malzemenin elektromekanik etkileşim faktörüdür ve mekanik enerjinin elektrik enerjisine, yine bunun tersi olarak elektrik enerjisinin mekanik enerjiye dönüşüm verimliliğini ifade eder.



3. TEORİK ÇALIŞMALAR

Bu projede hem deneysel hem de teorik metotlar uygulanarak çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Buna göre ilk aşamada, literatürdeki bilgilerin derlenmesine müteakip uygun piezoelektrik levhalardan manyetik olmayan esnek metaller kullanılarak farklı doğal frekanslarda verimli çalışabilecek piezo levhalar tedarik edilmiştir. Bu malzemelerin doğal frekansları, proje kapsamında temin ettiğimiz titreştiricilerle tespit edilmiştir. Bu titreşimler sırasında oluşturdukları denge noktasına göre konumları, hızları ve ürettikleri gerilimler belirlenmiştir. Bu verilerden hareketle piezo levhaların karakteristikleri incelenmiştir.

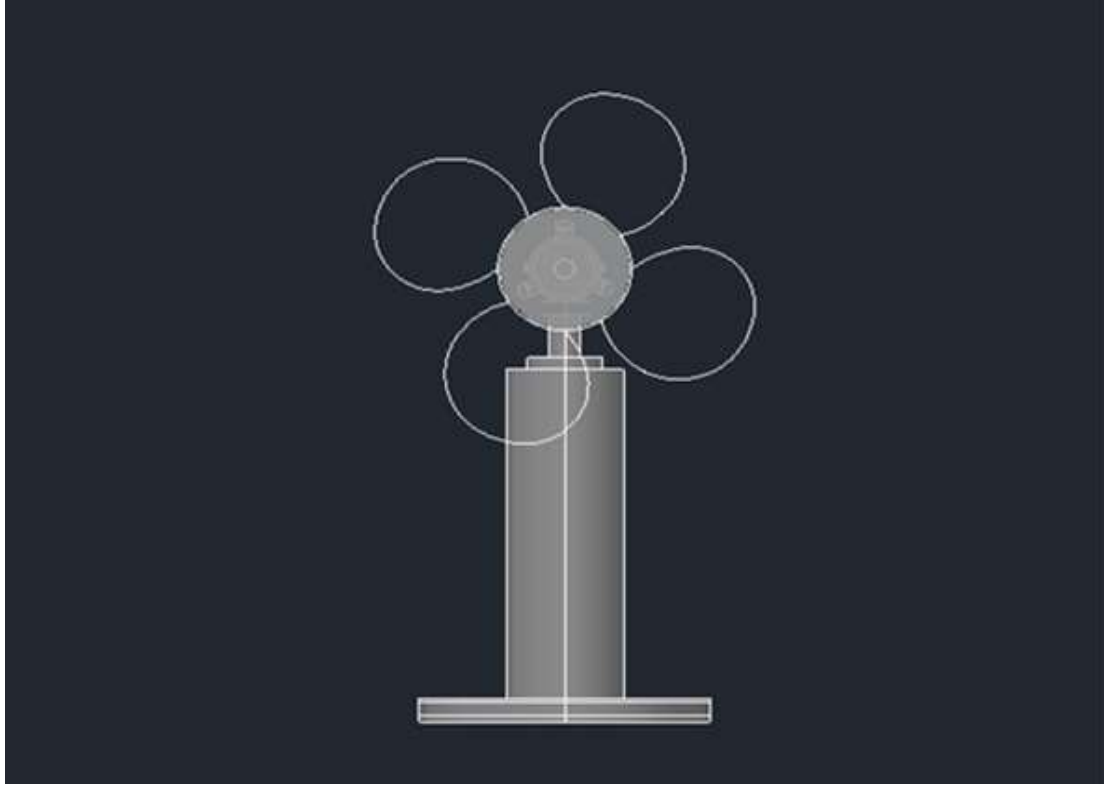
Piezoelektrik levhaların karakteristiklerinin belirlenmesinden sonra elektromanyetik benzetimlerle manyetik temassız özelliğin ne derece elde edilebildiğiyle ilgili benzetim testleri yapılmıştır. Bunun için levhanın uçlarında mıknatıs olduğu halde belli mesafelerdeki manyetik akı yoğunlukları elde edilerek bu mesafelerdeki mıknatısların birbirine uygulayacağı kuvvetlerin optimum olması için gereken akı yoğunluğu bulunmuştur. Bu değerin $B=0,2$ T civarında olması ve mıknatıslar arası mesafenin 1,1 cm olması durumunda levhaların kırılmadan ve temassız çalışabileceği tespit edilmiştir. Bütün simülasyon çalışmaları, AutoCad çizimini müteakip Maxwell elektromanyetik sonlu elemanlar paket programı ile gerçekleştirilmiştir.

AutoCad çizimlerinden sonra imal edilen prototip geniş bandlı rüzgar enerjisi üretici ile deneysel testlere başlanmıştır. Farklı hızlarda prototipin denenmesi amacıyla yapılan rüzgar tüneli testleri, önemli sonuçlar vermiştir. Bu deneylerde her bir piezoelektrik terminalinin çıkışları okunarak, farklı elektrik yüklerine göre üretilen güçler belirlenmiş ve bundan sonraki yapılacak olan çalışma için 3 terminalin çıkış dalga formları gözlemlenmiştir.

Projenin son kısmında ise bu 3 terminalin doğrusal olmayan dalga formları 3 fazlı doğrultucu ile doğrultulmuş, filtre edilmiş ve nihai olarak dc gerilim, belirli bir gerilim değerinden az üretim durumunda kondansatörlerde depolanmıştır. Bu gerilimden büyük olması durumunda ise yüke gerilim vermek suretiyle üreticin çalışması sağlanmıştır.

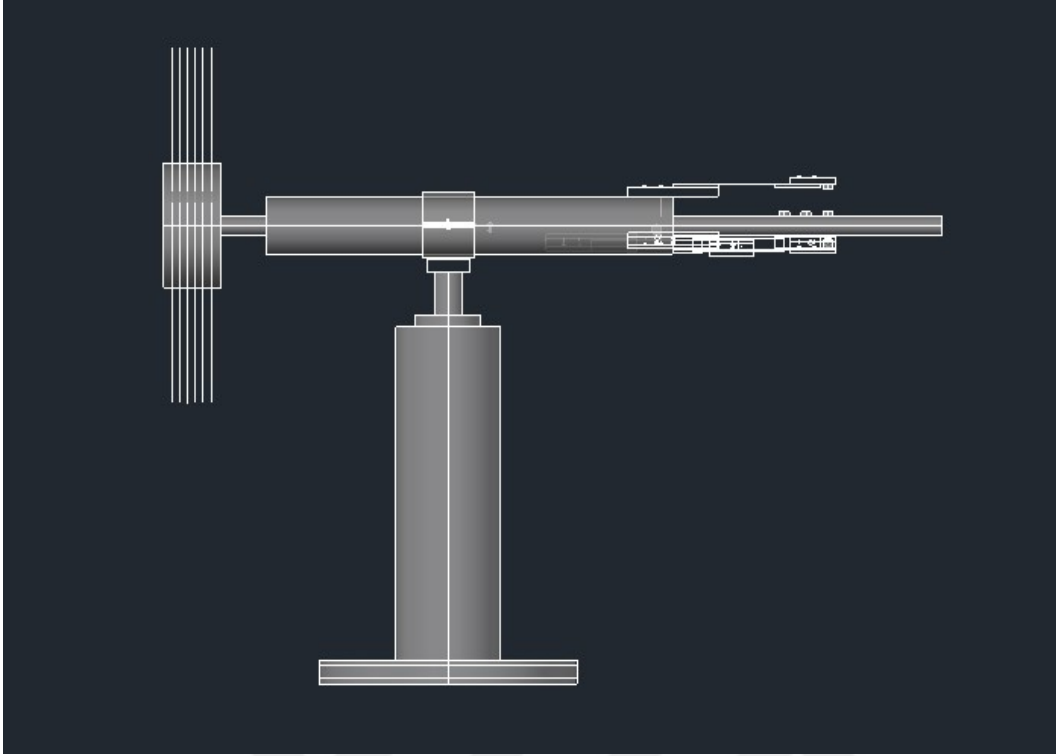
Projenin ilk aşamasında model bilgisayar ortamında tasarlanmış ve çizimleri yapılmıştır. İlk protip çizimini AutoCad'te yaptığımız cihazın, umulan şekilde bir kanatlı eksen etrafına

geçirilmiş mıknatıslar ile bu mıknatısların karşılarında yer alan piezoelektrik levhalar ile manyetik olmayan elastik metal çubukları ve bunların uçlarında mıknatıslı yerleşimi Şekil 3.1 (a,b,c)'de verilmiştir.

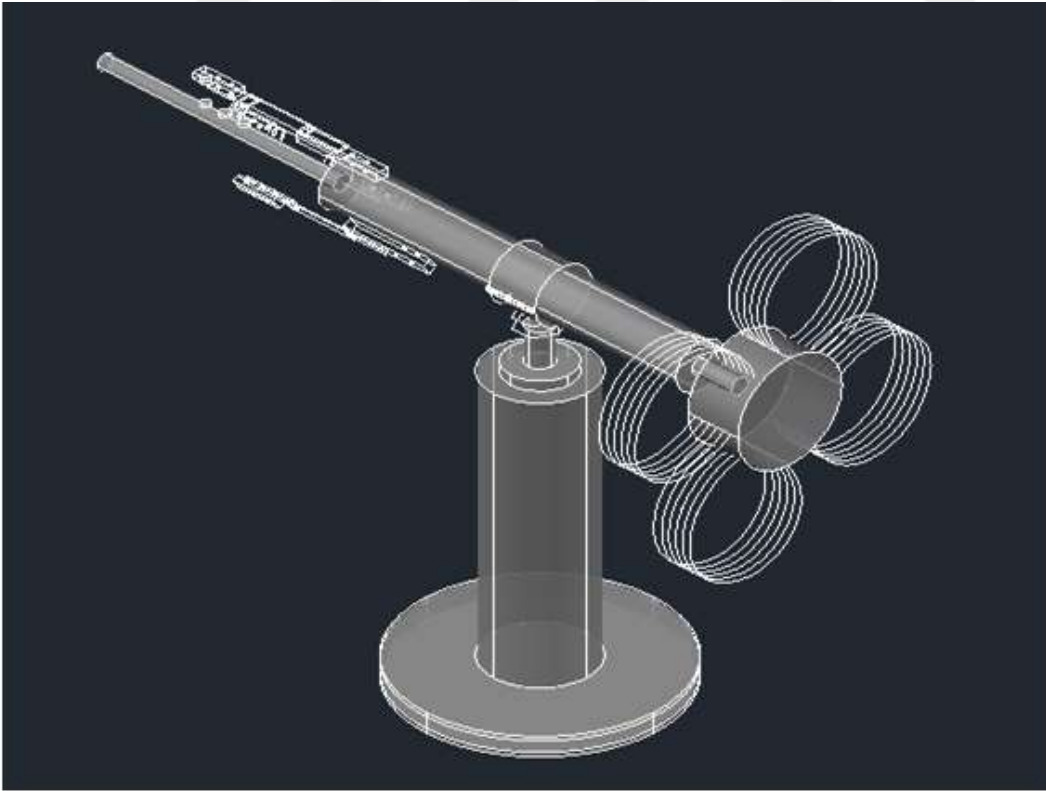


(a)

Şekil 3.1. Piezoelektrik rüzgar üreticinin (a) ön yüz (b) yan yüz ve (c) genel çizimi



(b)



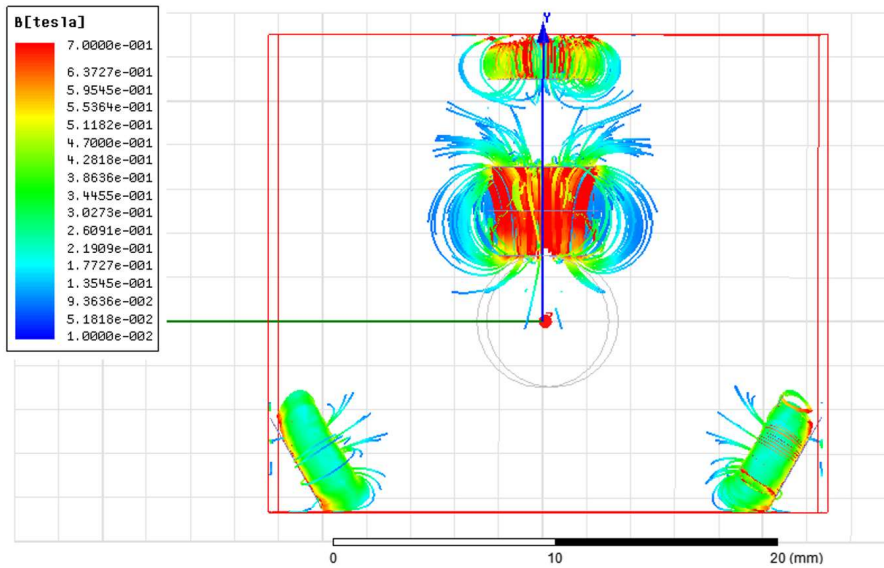
(c)

Şekil 3.1. (devam) Piezoelektrik rüzgar üreticinin (a) ön yüz (b) yan yüz ve (c) genel çizimi

Tasarlanan sistemde, her bir levhanın uç kısmına birer mıknatıs yerleştirilmiştir. Mil üzerine de, bu mıknatısların tam karşı hizasına gelecek birer mıknatıs eksen doğrultusunda sabitlenmiştir. Mil üzerindeki ve piezo levha üzerindeki mıknatısların kutupları, birbirini itecek şekildedir.

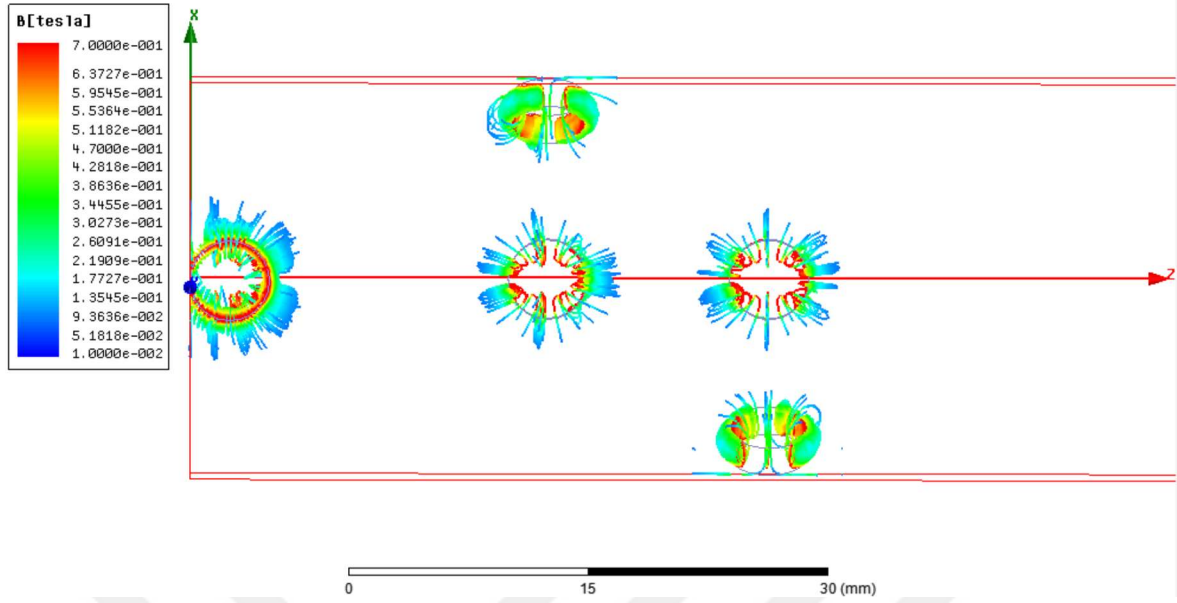
Rüzgarın kanatçıkları döndürmesiyle, aynı eksen üzerine sabitlenmiş olan mıknatıslar da dönecektir. Bu sayede, eksen üzerindeki her bir mıknatıs, kendi karşısında bulunan piezo levha mıknatısının hizasından geçerken, onu fiziksel bir temas olmadan iterek levhanın bükülmesini sağlayacaktır. Meydana gelen bu bükülmeler, levhanın terminalleri arasında potansiyel fark oluşmasına sebep olacaktır.

İkinci teorik çalışma olarak elektromanyetik tasarımla mıknatısların ne oranda itilebildiğinin bir ölçüsü olarak mıknatısların arasındaki bölgede manyetik akı yoğunluğunun benzetim sonuçları elde edilmiştir (Şekil 3.2 (a,b,c)). Bunun için elde edilen elektromanyetik modelleme, laboratuvarımızdaki Maxwell sonlu elemanlar program paketi ile çalışılmıştır. Şekilde görüldüğü üzere mıknatısların ara bölgesinde cihazın temassız çalışmasına sebep olan ve bu projede önemli bir özellik olarak tanımlanan simülasyon sonucunu görülmektedir. Ara bölgedeki manyetik yoğunluğun $B = 0.2 \text{ T}$ 'da veya düşük olması bu etkinin varlığını kanıtlamaktadır.

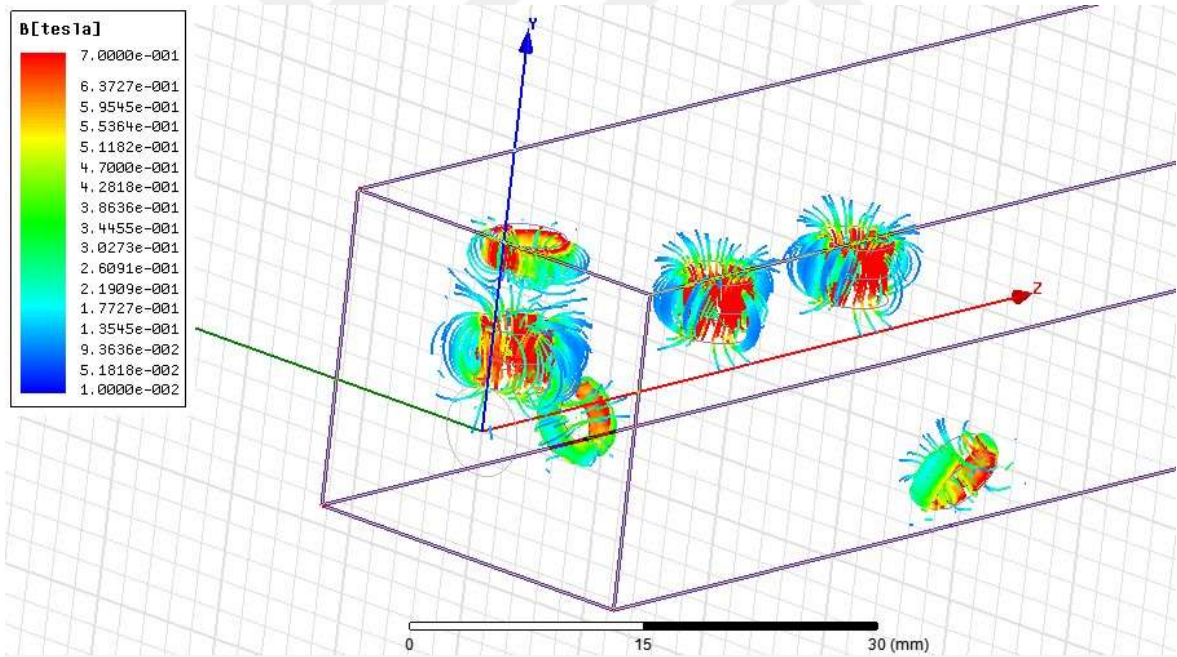


(a)

Şekil 3.2. Elektromanyetik sonlu elemanlar benzetimi: (a) Eksenel, (b)Yan, (c) Genel görünüm



(b)

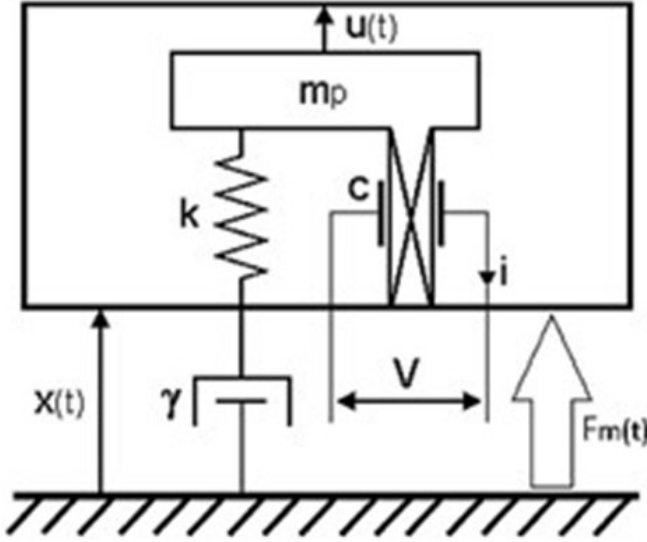


(c)

Şekil 3.2. (devam) Elektromanyetik sonlu elemanlar benzetimi: (a) Eksenel, (b)Yan, (c) Genel görünüm

Şekil 3.2’de dışarıda bulunan mıknatıslar birbirine göre 120 derecelik açı ile yerleştirilmiştir. Dolayısıyla sırasıyla eksen üzerindeki üç mıknatısa her birinin karşısında bulunan bu mıknatıslar gelerek piezo levhaların bu mıknatıslarca itilmesine sebep olacaktır.

Dolayısıyla mıknatısların kendi üzerine kapanan akı yoğunluğu 0.7 T iken iki mıknatıs arası boşlukta bu değer 0.2 T'ye düşerek manyetik itmeyi oluşturmaktadır. Sadece bir levha için kuvvet denklemi şu şekilde özetlenebilir:



Şekil 3.3. Elektromanyetik uyartım altında piezoelektrik levhanın modellenmesi

Şekil 3.3’de piezoelektrik yapının kütlesi, k sertlik katsayısı, b magnetik kayıplara karşılık gelen sönüm katsayısı $u(t)$ piezoelektrik levhadaki bükülme miktarı, $x(t)$ sarkacın sapma miktarı, $F(t)$ sarkaca etki eden manyetik kuvvet, C piezoelektrik levhanın kapasitesi, i ve v elde edilen akım ve gerilimi ifade etmektedir. Buna göre şu bağıntılar yazılabilir:

$$F(t) = ku + \alpha V + F_m \quad (2a)$$

$$i = \alpha \frac{du}{dt} - c \frac{dV}{dt} \quad (2b)$$

Burada α mekanik kuvvetin elektriksel potansiyele dönüşme oranını veren faktördür. Bu durumda hareket denklemi şu şekilde gösterilebilir:

$$(m + m_p) \frac{d^2 x'}{dt'^2} = -b \frac{du'}{dt'} - m_p \frac{d^2 u'}{dt'^2} - ku' - \alpha V - F_m(t) \quad (3)$$

Burada b sönüm katsayısı, γ (testlerimizde 1.48 olarak ölçülmüştür) ve piezoelektrik kütle ile çubuğun geri kalan kütlelerinin toplamının oranı şeklinde ifade edilmiştir. Bu denklem sistemi daha açık yazıldığında, aşağıdaki denklemler elde edilmektedir:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 x'(t)}{dt'^2} &= -\frac{\gamma}{(m+m_p)} \frac{du'(t)}{dt'} - \frac{m_p}{(m+m_p)} \frac{d^2 u'(t)}{dt'^2} - \frac{ku'(t)}{(m+m_p)} - \frac{\alpha V(t)}{(m+m_p)} - \frac{F_m(t)}{(m+m_p)}, \\ \frac{dV'(t)}{dt'} &= \frac{\alpha}{C} \frac{du'(t)}{dt'} - \frac{I(t)}{C}, \end{aligned} \quad (4)$$

Burada; ikinci denklem, ifade edilen piezoelektrik uçları arasında oluşan gerilim, piezoelektrik terminalerinden geçen akımı ve u' piezoelektrik uç yer değiştirmesini de içerecek şekilde bir bağıntı ortaya koyar [1-4]. İkinci denklemdeki en önemli sabit ise piezoelektrik levhanın kuvvete karşı ne kadarlık gerilim üretebildiğini tanımlayan α sabitidir. Buradaki C de piezoelektriktriğin içerisindeki yük birikimi sağlayan ve malzemeye bağlı özellik olan sığa miktarıdır. Kullandığımız piezoelektriktriğin sığası $C=232$ nF, $\alpha=0.0001$ N/V'dur. Esneklik katsayısı k ise 33.435 N/m'dir. Denklemlerin sayısal çözüme konulması için birinci mertebeden denklem sistemi olarak yazılması gerekmektedir. Bu yüzden sadece bir piezoelektrik için elde edilecek denklem aşağıdadır:

$$\begin{aligned} \frac{du}{dt} &= y, \\ \frac{dy}{dt} &= -\frac{\gamma\tau}{3m+4m_p} y - \frac{k\tau^2}{3m+4m_p} u - \frac{(m+m_p)\tau^2 F_m(t)}{(3m+4m_p)d} - V \frac{\alpha\tau^2 V_0}{(3m+4m_p)d}, \\ \frac{dV}{dt} &= \frac{\alpha d}{CV_0} \frac{du}{dt} - \frac{\tau V}{V_0 CR_L}. \end{aligned} \quad (5)$$

Tek bir levha için elde edilen bu kuvvet denklemi üç levha için şu şekilde özetlenebilir:

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (6a)$$

$$L_1 \frac{d^2 r_1}{dt^2} = \frac{1}{\rho A} (k u_1(t) + \alpha V_1(t) + F_m \delta(\theta - \theta_{10})) \quad (6b)$$

$$L_2 \frac{d^2 r_2}{dt^2} = \frac{1}{\rho A} (k u_2(t) + \alpha V_2(t) + F_m \delta(\theta - \theta_{20})) \quad (6c)$$

$$L_3 \frac{d^2 r_3}{dt^2} = \frac{1}{\rho A} (k u_3(t) + \alpha V_3(t) + F_m \delta(\theta - \theta_{30})) \quad (6d)$$

$$I_1(t) = \alpha \frac{du_1(t)}{dt} - C \frac{dV_1(t)}{dt} \quad (6e)$$

$$I_2(t) = \alpha \frac{du_2(t)}{dt} - C \frac{dV_2(t)}{dt} \quad (6f)$$

$$I_3(t) = \alpha \frac{du_3(t)}{dt} - C \frac{dV_3(t)}{dt} \quad (6g)$$

Burada L_n farklı uzunluklu levhaları gösterirken I_n piezoelektrik teminallerden elde edilen akımları, r_n ise radyal olarak piezoelektrik levha uçlarının eksene olan uzaklıklarını temsil etmektedir. İlâveten her bir piezoelektrik levhanın montelendiği açısal konumları da θ_n temsil etmektedir.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu projede kullanılacak deney seti projenin ilk yılında tamamen oluşturulmuş ve bölümümüzdeki diğer cihazların da deneylere eklenmesi suretiyle aşağıdaki şekillerde ayrıntılı gösterilmiştir. Resim 4.1(a)'da deneylerde elektriksel ölçmelerde kullandığımız dijital multimetremiz gösterilmiştir. Bu cihazla ortalama gerilim, akım ölçümleri gerçekleştirilmiş olup bu verilerden üretilen ortalama elektriksel güç tanımlanmıştır. Resim 4.1(b)'de ise titreştirici ve üzerine ölçme için takılı halde piezoelektrik levha gösterilmiştir. Titreştiricinin üzerine mikro saniye hassasiyetle denge konumundan sapmayı tespit eden lazer yer değiştirme sensörü yerleştirilmiştir. Bu setle farklı uzunluktaki piezo levhaların doğal frekansları hassas doğrulukla tespit edilebilmiştir. Resim 4.1(c)'de eşzamanlı 4 parametrenin hassas ölçümünü yapan ve LabView ortamında kayıtlarını sağlayabilen National Instruments veri alım kartı ve yanında ayarlanabilir direnç kutusu yer almaktadır. Gerek elektrik yüklerinde elde edilen güç miktarlarında gerekse de konum, hız ve gerilim kayıtlarında sıkça kullanılmış bir sistemdir. Veri alım kartı bilgisayara bağlanarak alınan çeşitli değerler bilgisayardaki arayüze başarıyla aktarılmıştır.



(a)



(b)

Resim 4.1. Deneysel düzenek



(c)



(d)

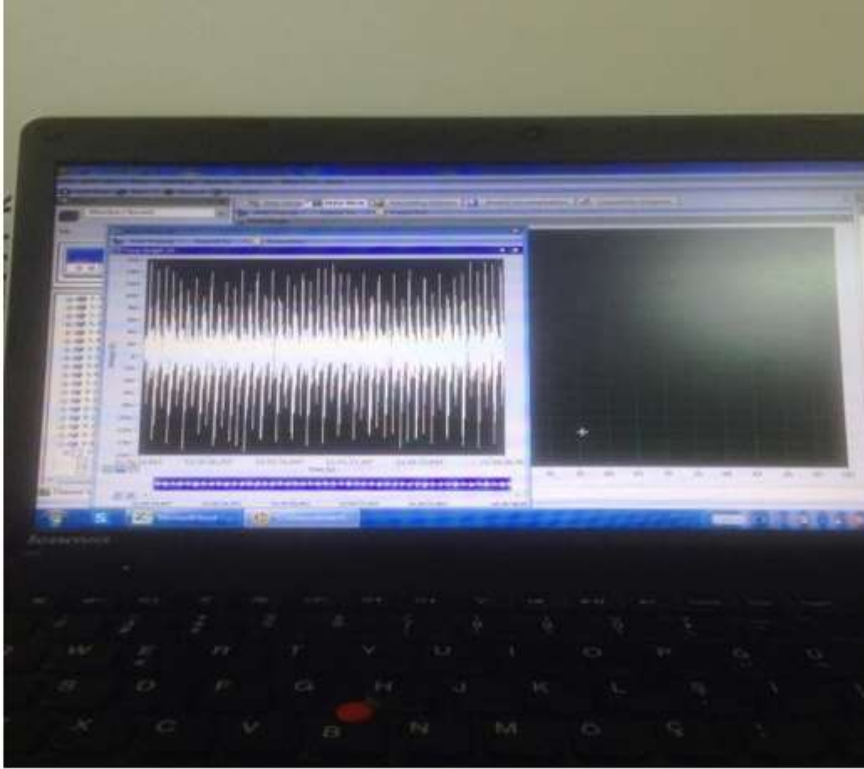
Resim 4.1. (devam) Deneysel düzenek

Resim 4.1(d)'de titreştiricinin yükseltici ünitesi, sinyal üretici ve osiloskop görülmektedir. Titreştiricinin belirli frekansta ve genlikte çalışmasını sağlayan sistem olup farklı piezo levhaların doğal frekans belirleme deneylerinde başarıyla kullanılmıştır.

Bu projede kullanılan piezoelektrik levhaların doğal frekansları elde edilecek güç açısından önemlidir. Burada önemli olan nokta levhaların titreşim frekansının doğrudan rüzgâr hızına bağlı olmasıdır. Ancak rüzgâr hızının yüksek olması, her zaman elde edilen gücün de yüksek olacağı anlamına gelmemektedir. Çünkü bu sistemde esas olan konu sistemin doğal frekansını veren rüzgâr hızlarının sayısını artırmaktır. Doğadaki her sistemin doğal frekansı birbirinden farklıdır ve bu salınan levha şeklindeki (sarkaç) sistemlerde levhanın boyuna bağlı olarak değişmektedir. Bu bilgiden hareketle herhangi bir sistemde istenen doğal frekans baskın rüzgâr hızlarına bağlı olarak ayarlanabilmektedir. Çalıştığımız sistemde özdeş üç adet piezoelektrik levhaya farklı boylarda manyetik özellik göstermeyen esnek metal levhalar monte edilerek üç farklı doğal titreşim frekansı elde edilmiştir. Bu durum farklı rüzgâr hızlarında maksimum elektrik enerjisi elde edebilmek için önemli bir avantaj sağlamaktadır. Doğal frekansa ilişkin deneyler literatüre uygun olarak titreştirici ile yapılmıştır (Resim 4.2 (a ve b)).



(a)



(b)

Resim 4.2. Piezoelektrik doğal frekans tespit deneyi: (a) Titreştirici ve test edilen piezoelektrik levha lazer yer değıştirme sensörü ile (b) LabView ara yüzüne sensörden gelen verilerin kaydı

Bu çalışmadan elde edilen veriler Resim 4.2(b)'de gösterildiği şekilde veri alım kartından LabView' e gönderilmiş ve eşzamanlı olarak hem konum ve hız hem de test edilen piezo levhanın uçları arasındaki gerilim eşzamanlı olarak kaydedilmiştir. Piezoelektrik levhalar, titreştiricinin ucuna takılarak farklı frekanslarda titreşmeleri sağlanmıştır ve farklı elektriksel yüklerin piezoelektrik terminallerine bağlanması suretiyle deneyler gerçekleştirilmiştir. Titreştirici ile 0.5 Hz'ten 40 Hz'e kadar yapılan deneylerde bilhassa 20 Hz'den yukarıdaki frekanslarda piezo levhaların dayanımını büyük genlikten dolayı yitirdiği ve ortadan ikiye ayrıldığı saptanmıştır. Bu sebepten dolayı deneylere 0.5 – 20 Hz aralığında devam edilmiş ve malzeme emniyeti sağlanmıştır. Deneylerde kullanılan piezo levhalar Yapılan çalışmalarda kullanılan piezoelektrik levha Piezo Systems marka, D220-A4-203YB model olup aşağıdaki özellikte orta kalınlıkta olanlarla deneyler gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.1).

PERFORMANCE: DOUBLE QUICK-MOUNT EXTENSION GENERATORS (Cantilever)								VALUES TO BE USED AS GUIDELINES		
PART NUMBERS DOUBLE QUICK-MOUNT EXTENSION GENERATORS		PIEZO MATERIAL	WEIGHT (grams)	STIFFNESS (N/m)	CAPACITANCE (nF) (Parallel Operation)	RATED TIP DEFLECTION ① ($\mu\text{m}_{\text{peak}}$)	RATED FREQUENCY ① (Hz)	OPEN CIRCUIT VOLTAGE ① At rated deflection, parallel operation (V _{peak})	CLOSED CIRCUIT CURRENT ① Per sinusoidal cycle, at rated deflection, parallel operation. ($\mu\text{A}_{\text{peak}}$ / Hz)	RATED OUTPUT POWER ① At rated deflection and frequency (mW _{rms})
 X-poled for parallel bending operation (3 wire).										
D220-A4-103XE		5A4E	1.1	2x10 ⁶	12	± 13	1500	± 64	± 5	60
D220-A4-203XE		5A4E	1.7	3x10 ⁶	26	± 13	1500	± 64	± 10	120
D220-A4-303XE		5A4E	2.7	7x10 ⁶	52	± 13	1500	± 64	± 21	240
D220-A4-503XE		5A4E	10.4	8x10 ⁶	260	± 25	750	± 64	± 105	630



-103, -203, and -303 Double Quick-Mount extension generator performance is based on an active extension length of 1.0". -503 performance based on 2.0" active length. Double Quick-Mount performance is based on the force being applied at the outermost tip of the mount.

(a)

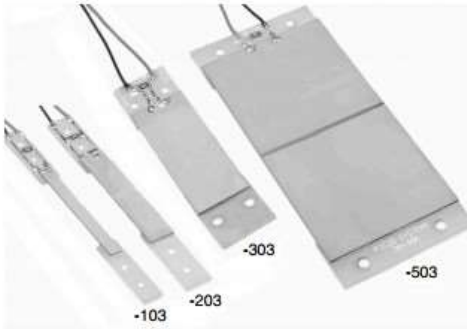
Şekil 4.1. Kullanılan piezoelektrik levha ve özellikleri [24]

2-PIEZO LAYER ELEMENTS

PIEZO SYSTEMS, INC.

65 Tower Office Park Woburn, MA 01801 • Tel: (781) 933-4850 • Fax: (781) 933-4743 • Web: www.piezo.com • E-mail: sales@piezo.com

STD. DOUBLE-QUICK-MOUNT EXTENSION GENERATORS PRE-MOUNTED AND WIRED, TWO ENDS



DESCRIPTION

When a mechanical force causes a suitably wired and polarized 2-layer element to extend (or contract), both layers are stretched (or compressed) at the same time. Charge develops across each layer in an effort to counteract the imposed strain. This charge may be collected for strain sensing or power generation.

Double Quick-Mount extension sensors save users the trouble of mounting and wiring transducer elements. They are easily attached and removed from equipment using the two clearance holes in the PCB mounts. They are wired for parallel operation. The user may opt to remove the board mounted bleed resistor which protects the transducer and user electronics from transient voltages arising from thermal and mechanical shocks. The user mounts the transducer to the source of mechanical strain.

Standard Double Quick-Mount Extenders are more economically priced than other Double Quick-Mount configurations, and are generally stocked for immediate delivery.

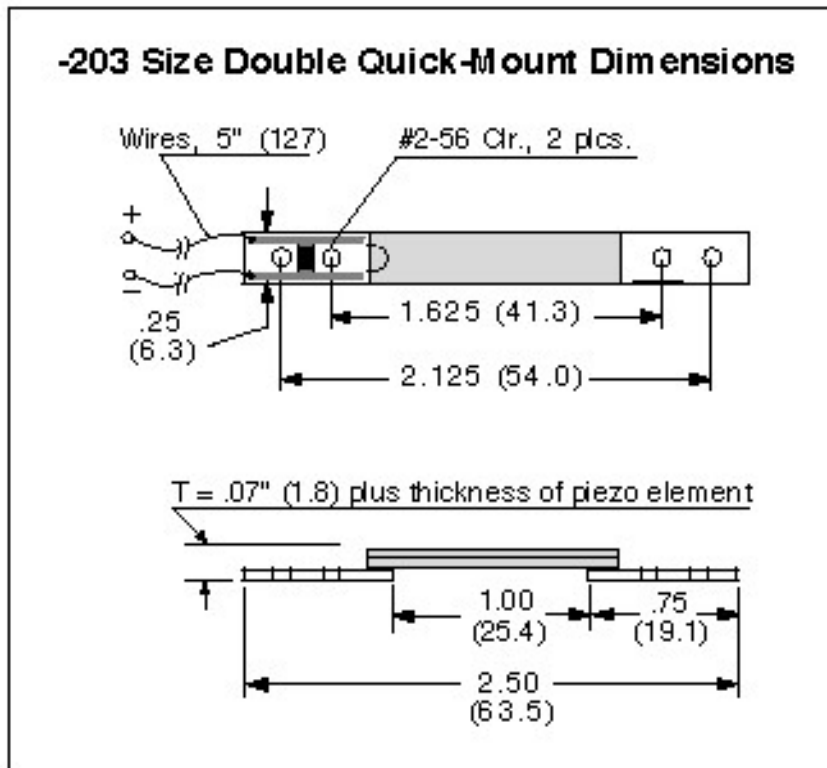
Standard Double Quick-Mount Extenders employ T220-A4-103X, T220-A4-203X, T220-A4-303X or T220-A4-503X standard brass reinforced transducers.

Dimensions for Standard Double-Quick-Mounts are shown on [page 48](#).

Custom configurations and sizes: Upon request.

ROHS: Compliant. Piezo exempt.

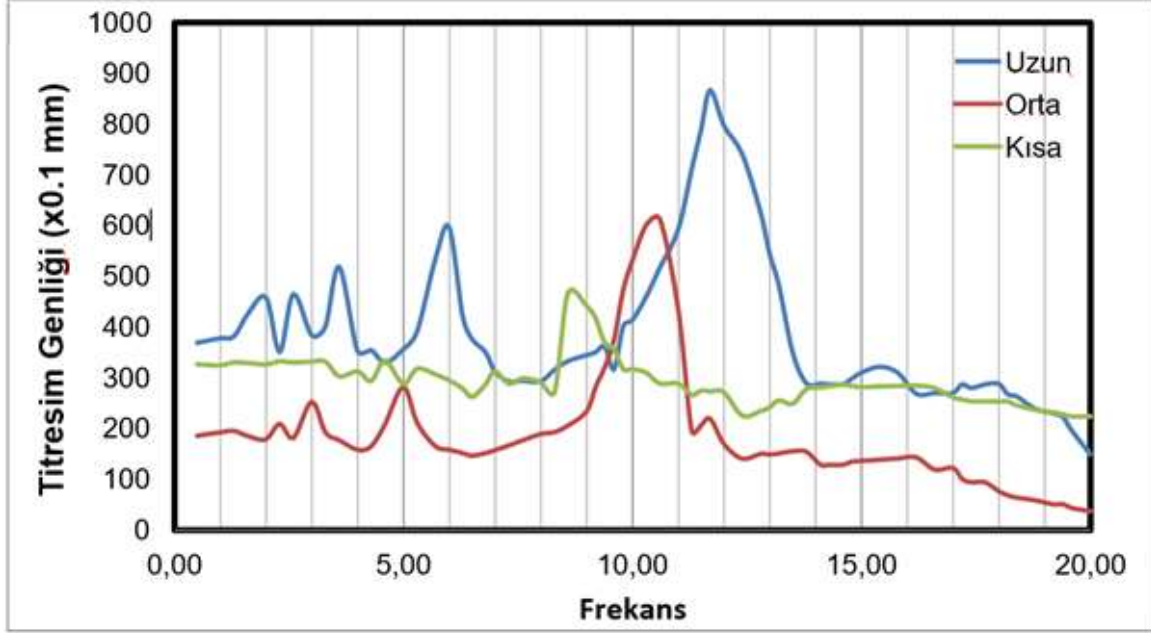
(b)



(c)

Şekil 4.1. (devam) Kullanılan piezoelektrik levha ve özellikleri [24]

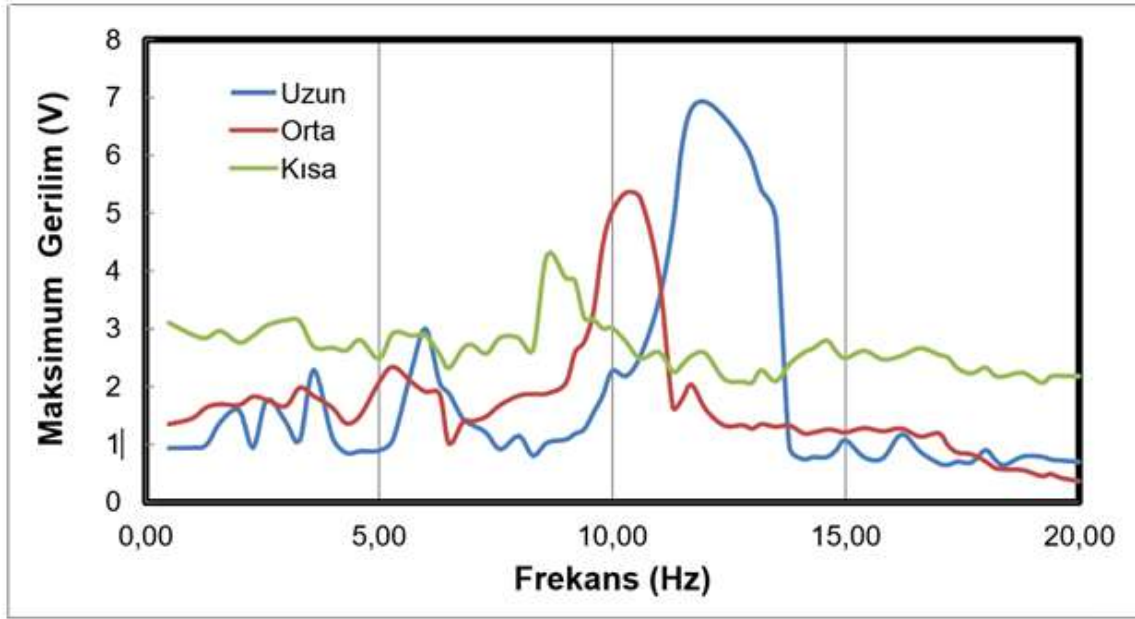
Şekil 4.2’de söz konusu doğal frekans testlerinden elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. Buna göre 15 cm (uzun), 13 cm (orta) ve 11 cm (kısa) uzunluklu tasarlanan levhaların maksimum titreşim genlikleri frekansa göre beklediğimiz şekilde farklılık göstermiştir.



Şekil 4.2. Doğal frekans tespiti için kullanılan frekansa bağlı piezoelektriklerin titreşim genliği cevapları

Bu grafiğe göre doğal frekanslar uzun levha için 11.7 Hz, orta levha için 10.5 Hz ve kısa levha için 8.6 Hz olarak ölçülmüştür. Ancak bu verilerin 20 Hz’e kadar olan frekanslarda geçerli olduğu unutulmamalıdır. Zira bu değerlerin üzerinde uzun levha kırılmaktadır.

Yine bu cevaptan hareketle harmonik-altı bileşenler olarak uzun levha 6.0 Hz, 3.6 Hz göze çarparken orta uzunluktaki levhada ise 5.0 Hz ve 3.0 Hz harmonik altı frekanslar olarak kaydedilmiştir. Bu titreşimler sırasında levhaların Şekil 4.2’deki genliklerine göre farklı gerilimler ürettiği gözlenmiştir. Şekil 4.3’te bu genliklere karşı elde edilen maksimum gerilimler gösterilmiştir. Görüldüğü üzere uzun, orta ve kısa levhalar için gerilimlerin maksimum değerleri frekansa göre çeşitlilik göstermektedir. Deneylere göre levhalar 12 Hz, 10.4 Hz ve 8.5 Hz değerlerinde maksimum gerilimi üretmektedir. Ancak bu değerler terminallere maksimum gücün elde edildiği 360 Kohm’luk direncin bağlanmasıyla ölçülmüştür.

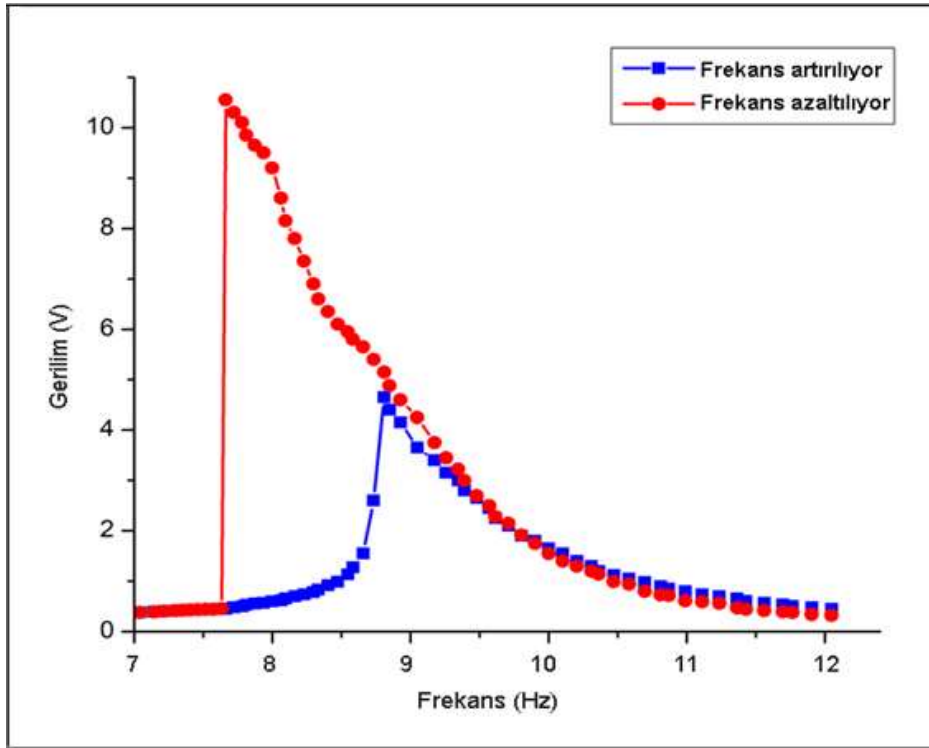


Şekil 4.3. Maksimum gerilimin frekansa bağlı değişimi

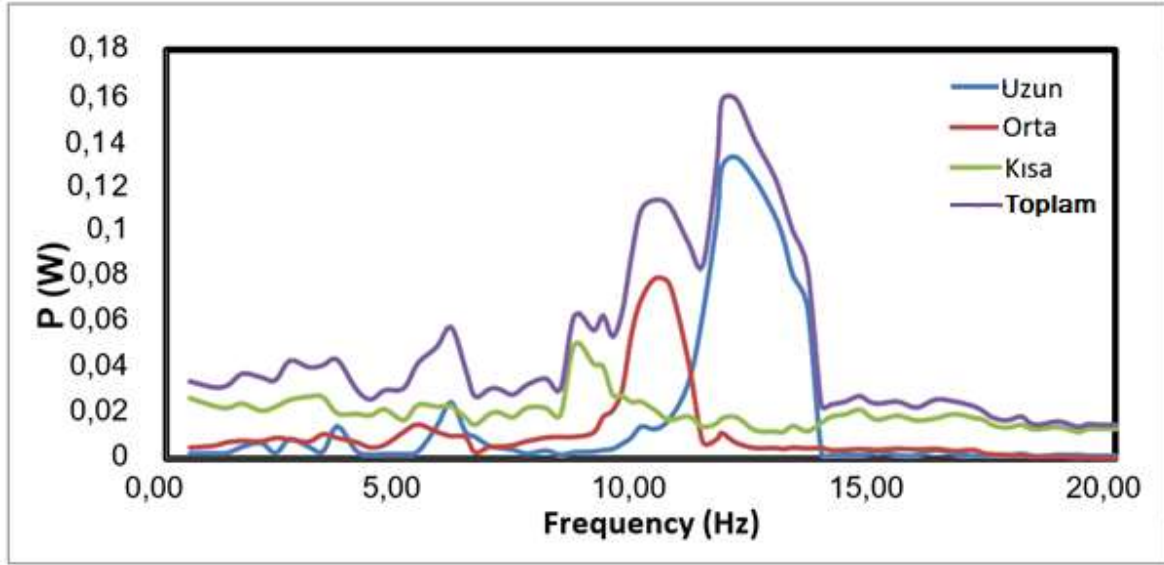
Şekil 4.3'te serbest salınımda elde edilen elektriksel güçler (P) gösterilmiştir. Buna göre uzun levha serbest salınımda 140 mW, orta levha 79 mW ve kısa levha 30 mW maksimum güç üreten salınımlar yapmaktadır. Farklı frekanslarda bu güçlerin dağılım göstermesi önceki beklentilerimizle uyumludur. Bu eğrilerin toplanması sonucu bütün frekanslar üzerine elde edilebilecek güçle ilgili bilgi sahibi olunabilir. Buna göre toplam gücün, 8.6 Hz ile 13.5 Hz arasında 70 mW ve üzeri değerler alabildiği gözlenmiştir. Bu durumda en az üç kat frekans aralığı artmış olup bu aralıklara düşen rüzgar hızlarında elde edilecek olan güç miktarı artırılmıştır.

Ayrıca sistemde üç farklı uzunlukta piezoelektrik levha ve manyetik olmayan çubuk eklentisi kullanıldığından her bir toplam çubuğun etkin sertlik katsayıları birbirinden farklı olacaktır. Bu durum ise güç üretiminde farklılık gösterecektir. Daha önce de ifade edildiği gibi, L_1 , L_2 ve L_3 boyları doğal salınım frekansını belirlediği için güç üretiminde önem arz etmektedir. Şekil 4.5'deki güç çıktısında, uzun boydaki (düşük etkin sertlikli), orta boydaki (orta etkin sertlikli) ve kısa boydaki (yüksek etkin sertlikli) güç miktarları ayrıntılı verilmiştir. Bu durumda düşük etkin sertlikli piezo-levhanın daha fazla güç miktarını daha yüksek rüzgar hızlarında elde edebileceği görülmüştür. Diğer yandan, yüksek etkin sertlikli malzemenin ise daha düşük rüzgar hızlarında etkin olabileceği anlaşılmıştır.

Deneysel çalışmalarımız boyunca, kullandığımız malzemenin, sert veya yumuşak piezoelektrik malzeme özelliklerinin hangisini gösterdiği üzerine de ek çalışmada bulunulmuştur. Buna göre; 2 Hz'den 15 Hz'e kadar yapılan deneylerde frekans artarken maksimum genlik 4.27 V bulunurken, yüksek frekanstan alçak frekansa azar azar indirme ile bu maksimum değerin 10.40 V'a karşılık geldiği görülmüştür. Bu gerilim ise doğal titreşim frekansının altı olan 7.8 Hz'e karşılık gelmektedir. Bu çalışmanın grafiksel ifadesi Şekil 4.4'te gösterilmiştir.

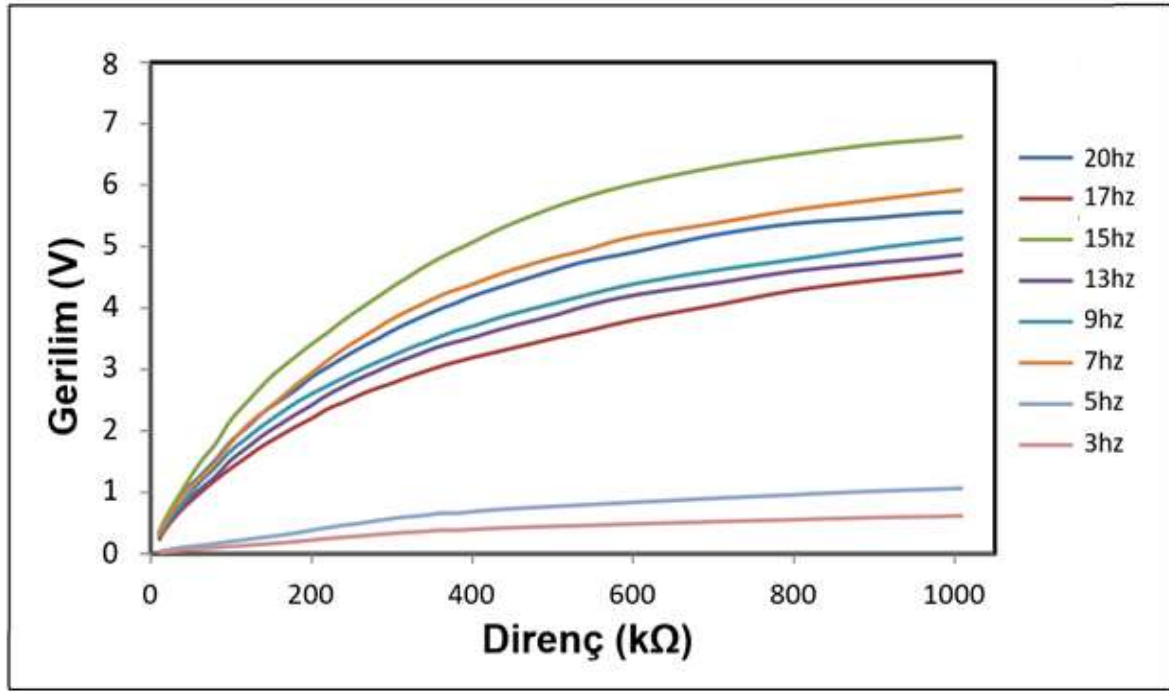


Şekil 4.4. Piezoelektrik etkinin frekans değişimine bağlı olarak elde edilen gerilim grafiği



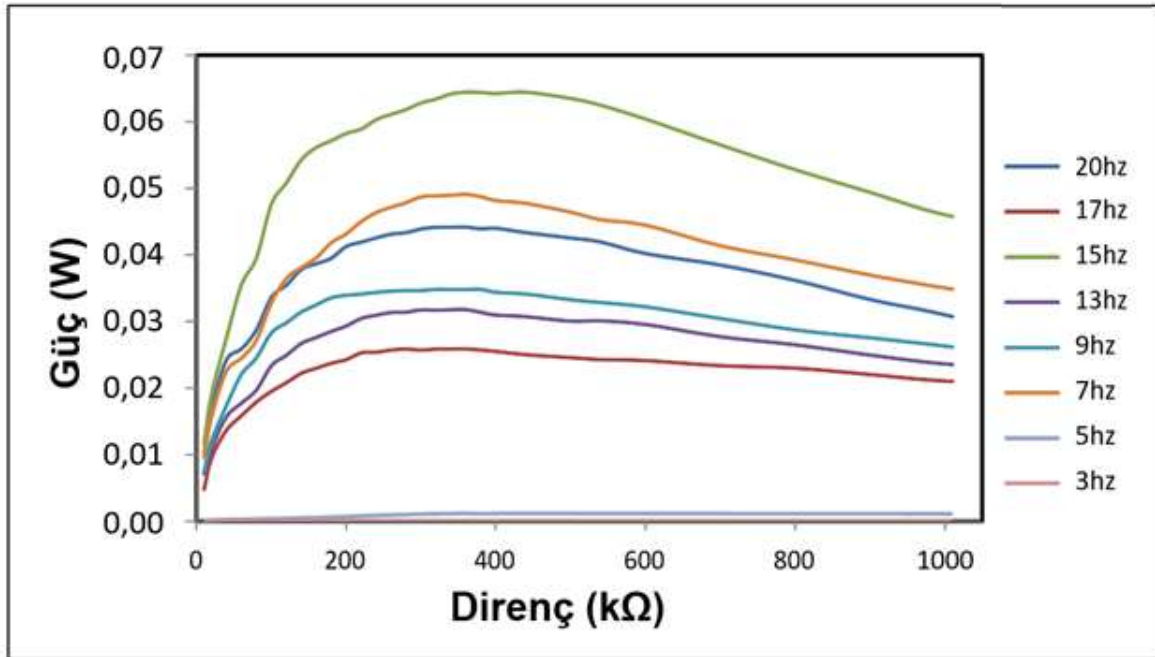
Şekil 4.5. Üç farklı uzunluktaki levhaların, serbest salınım altında 360 Kohm bağlı elektriksel yükten elde edilen maksimum güçleri

Şekil 4.6'da orta uzunluklu levhanın terminallerinin omik yüklere bağlanması sonucu elde edilen gerilim karakteristikleri verilmektedir. Buna göre titreşicinin farklı frekanslarına karşı gelen gerilimler 3 Hz'de düşük iken 15 Hz'de maksimum değerine ulaşmaktadır. Dolayısıyla 1.0 V ile 7 V aralığında maksimum gerilim elde edilmektedir.



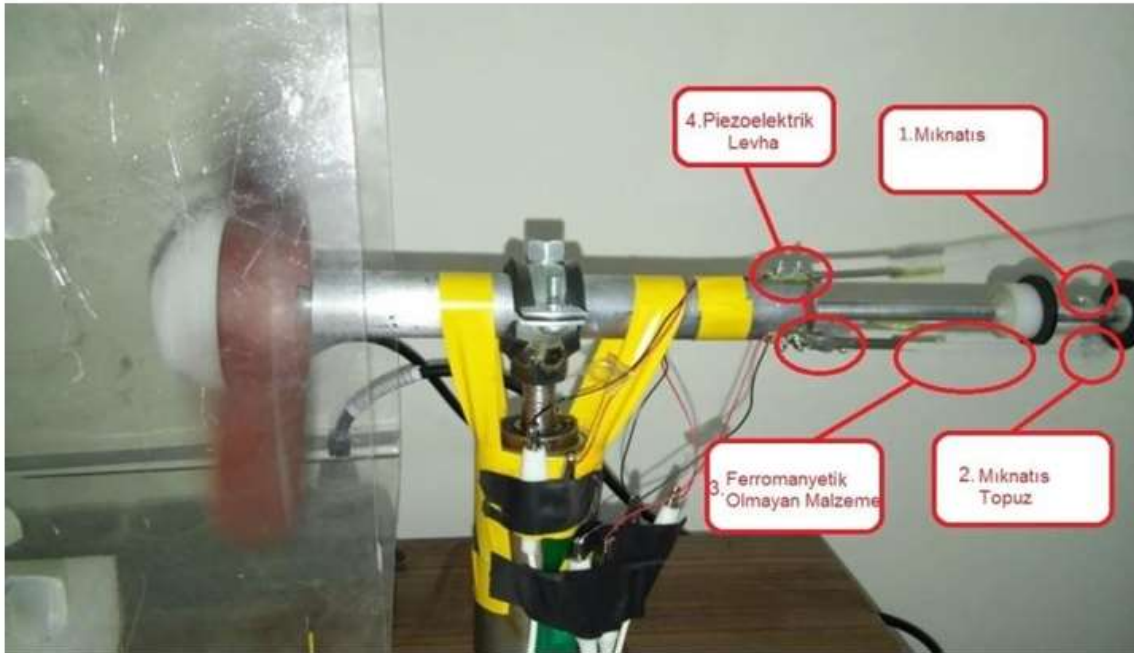
Şekil 4.6. Gerilimin omik yüke göre değişimi

Şekil 4.7’de orta levhanın maksimum güç değişiminin omik yüke göre değişimi verilmektedir. Buna göre maksimum güç 360 Kohm değerinde elde edilmektedir.



Şekil 4.7. Omik yüke göre güç değişimi

Tek tek levhaların genlik, gerilim ve güç çalışmalarının yapılmasını müteakip tasarıma uygun olarak kanatlı temassız piezoelektrik rüzgar üretici oluşturulmuştur. Tasarımda modelin dönme eksen ve eksen üzerindeki tüm bölümler mümkün olduğunca hafif ve sürtünmesi az olan malzemeler tercih edilerek bir araya getirilmiştir. Bunun için eksen içerisine iki adet rulman konularak sürtünme en aza indirilmesi hedeflenmiştir. Modelin pervanesi hafifliğinden dolayı plastik malzemeden seçilmiştir. Pervanenin bağlı olduğu mil hafifliğinden dolayı alüminyumdan yapılmıştır. Resim 4.3(a,b)'de prototip üreticinin ayrıntılı görünümü verilmiştir. Görüldüğü üzere eksen etrafına 120 derecelik açılarla piezoelektrik levhalar yerleştirilmiştir. Ortadaki dönebilen mil üzerine de levhaların karşılına gelecek şekilde sürekli mıknatıslar yerleştirilmiştir.



(a)

Resim 4.3. Temassız piezoelektrik rüzgar üretici: (a) Genel görünüm, (b) piezoelektrik ünitenin görünümü



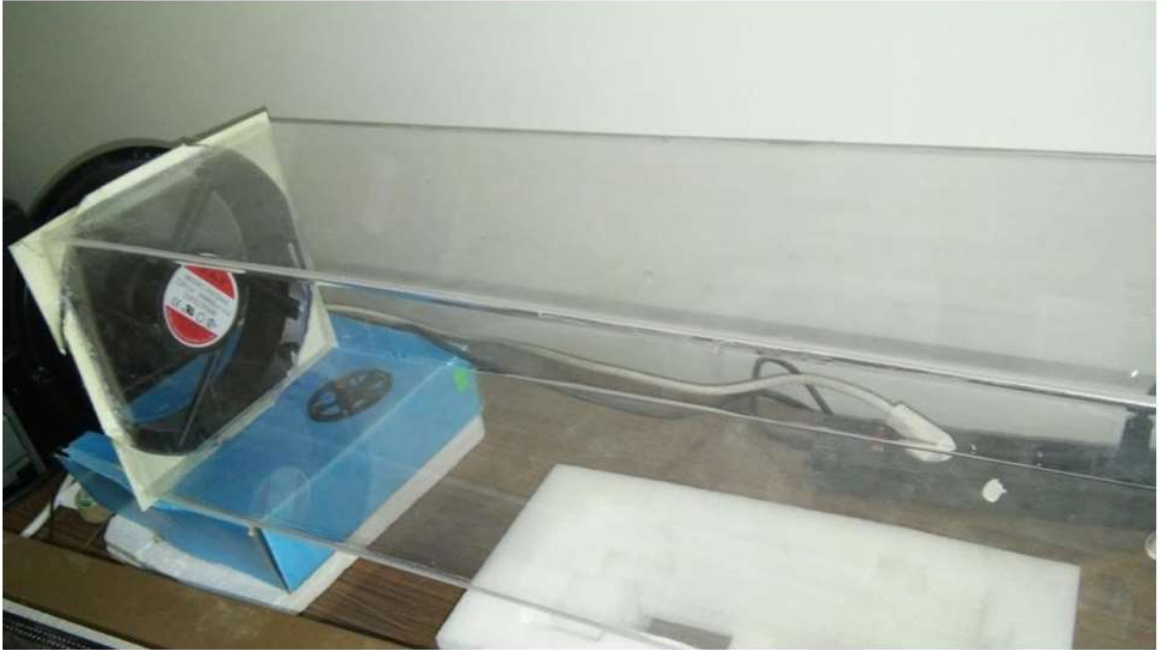
(b)

Resim 4.3. (devam) Temassız piezoelektrik rüzgar üretici: (a) Genel görünüm, (b) piezoelektrik ünitenin görünümü

Üretecın ekseni üzerindeki polietilen daireler ve esnek lastikler piezoelektriklerin titreşim sırasında mile fazla yaklaşarak deforme olmasını engellemektedir. Böylece genliğı artmış bulunan levha yavaşça kapanabilmektedir. Resim 4.4'te üreteç çalışır vaziyette rüzgar tüneli testleri sırasında gösterilmektedir. Rüzgar tüneli 20 cm x 20 cm'lik hava akısı gönderme özelliğine sahip olup testlere başlanmadan evvel tünelin hava akısı testleri ve anomometre ile kanatçık dönüşü ile rüzgar hızı arasındaki ilişkiyi veren testler yapılmıştır.

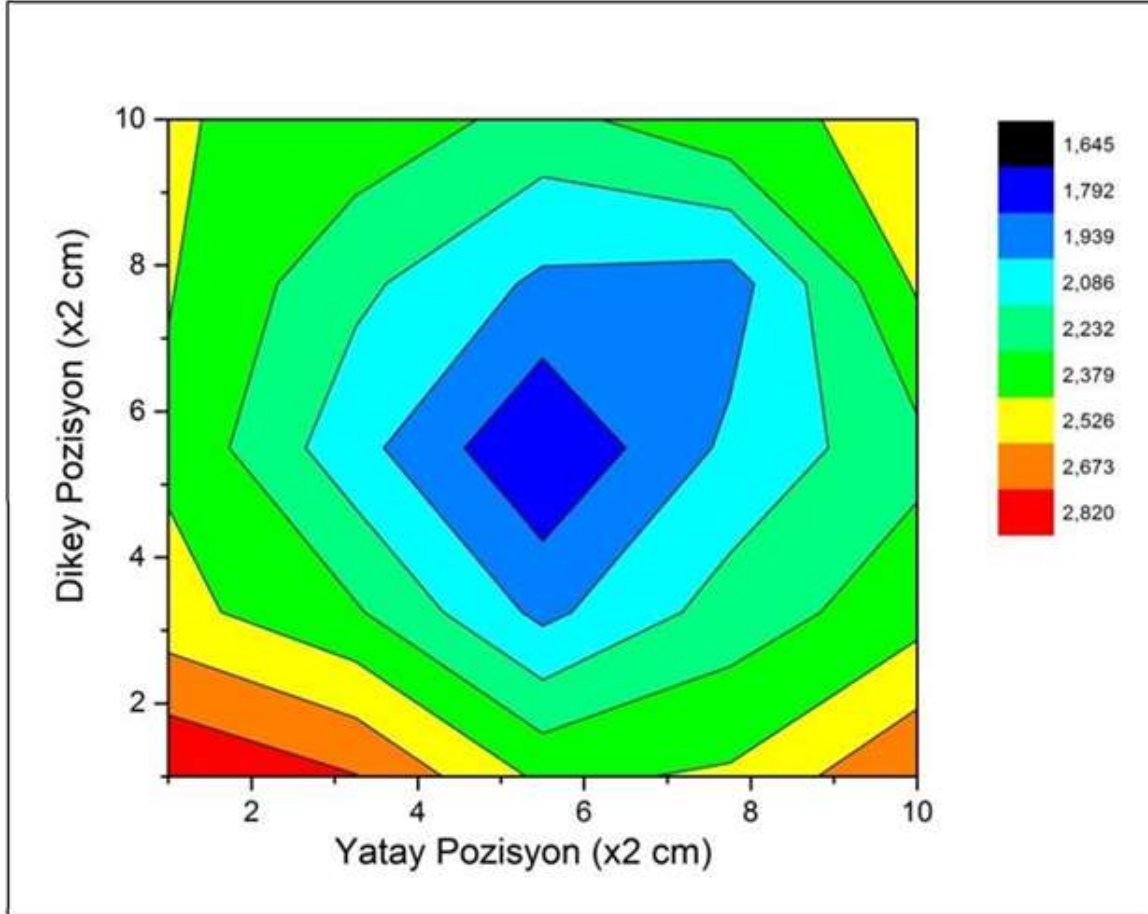


Resim 4.4. Temassız piezoelektrik rüzgar enerjisi üreticinin rüzgar tüneli testi



Resim 4.5. Rüzgar tünelinin genel görünümü

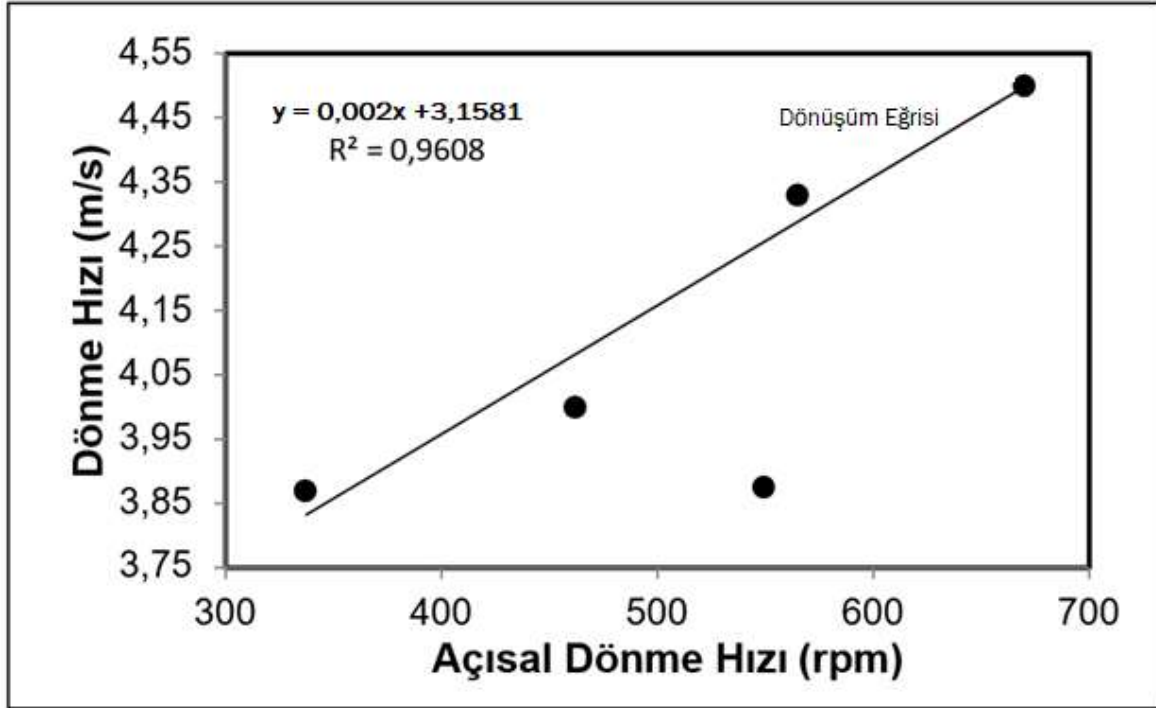
Rüzgar tüneli ön testlerinde hızı ayarlanabilir kanatlı bir motor sisteminden yararlanılmıştır (Resim 4.5). Bu düzenekle 1.5 m/s ile 10 m/s hızları arasındaki bütün rüzgar hızlarında testleri gerçekleştirebilmek mümkündür. Anemometre ile yapılan ön testlerde öncelikle tünelin içindeki hava akısının homojenlik özelliği incelenmiştir. Buna ilişkin yüzey grafiği Şekil 4.8’de sunulmaktadır.



Şekil 4.8. Rüzgar tünelinin akış özelliği (Rüzgar hızı birimi m/s)

Buna göre anemometrenin bulunduğu konum olan Şekil 4.8’in sol alt köşesi 2.68 m/s değerini okurken gerçekte kanatçıklara çarpan havanın hızı 1.99 m/s olmaktadır. Dolayısıyla bu değerler kalibre edilirse anemometreden okunan değer kalibrasyon sabiti olarak 0.74 ile çarpılması gerekmektedir. Bu bilgi ile anemometrenin konumuna göre okunan değer ile eşzamanlı olarak üretcin maruz kaldığı hız belirlenerek anemometre değeri gerçek değere indirgenebilmektedir. Böylece sonuçların uyumlu olması sağlanmaktadır. Diğer yandan türbin kanatçıklarının dönme açısal hızı ile hava akımı hızı arasındaki bağıntı da Şekil 4.9’da gösterilmektedir. Bu şekilde artan rüzgar hızıyla orantılı olarak hasatçının

kanatçıklarının döndüğü belirlenmiştir. Grafikteki doğrusal çizgi doğrusal fit edilmiş grafik olup bu çizginin fit edilmiş fonksiyonu da grafikte verilmiştir.



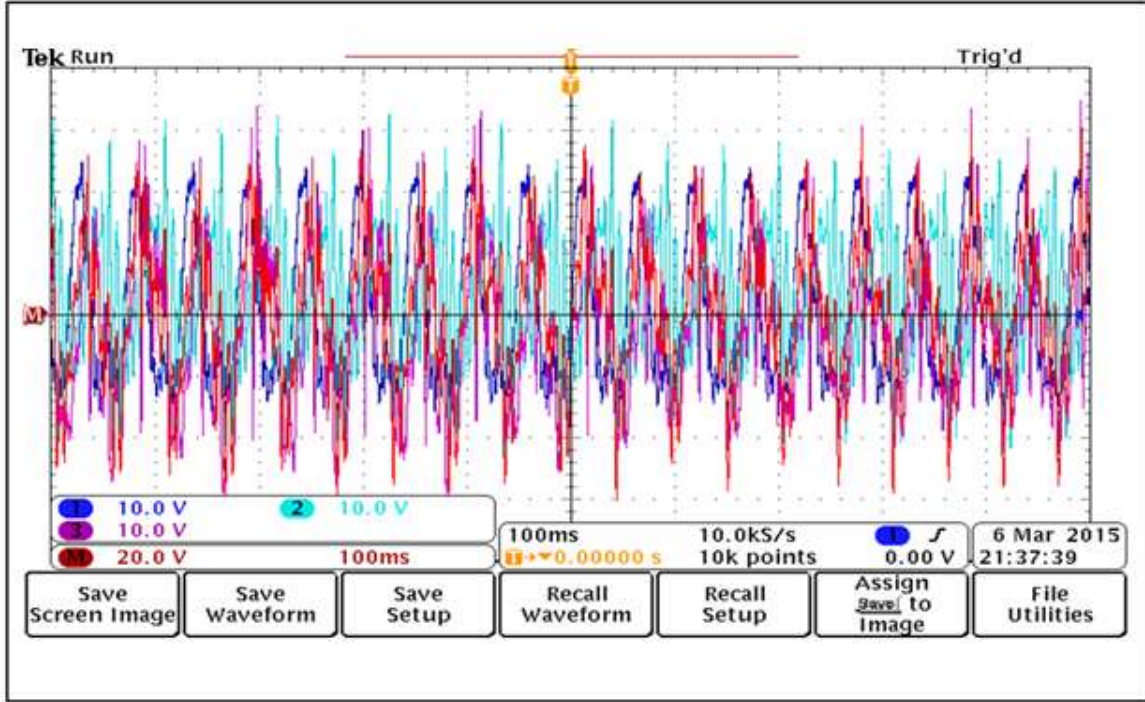
Şekil 4.9. Rüzgar hızı ile türbin açısal dönmesi arasındaki ilişki (y eksenini kalibre edildiğinde 2.78 m/s ile 3.37 m/s hızları arasında değişmektedir)

Yukarıdaki kalibrasyonlar ışığında yapılan deneylerde her üç piezoelektrikten elde edilen gerilimler osiloskopla okunarak kaydedilmiştir (Şekil 4.10). Kurulan düzende sol taraftaki rüzgar üretici tarafından oluşturulan hava akımı, orta kısımdaki 4 tarafı kapalı plexiglass rüzgar tribününden geçerek sağ tarafta bulunan piezoların takılı olduğu sistemin pervanesinin dönmesini sağlamaktadır. Bu sayede sistemin miline bağlı olan mıknatıslar, hızasına geldikleri piezo çubuğunu esneterek piezodan gerilim elde edilmesini sağlamaktadır. Piezolardan alınan gerilimler osiloskop aracılığıyla gözlemlenip kaydedilebilmektedir.



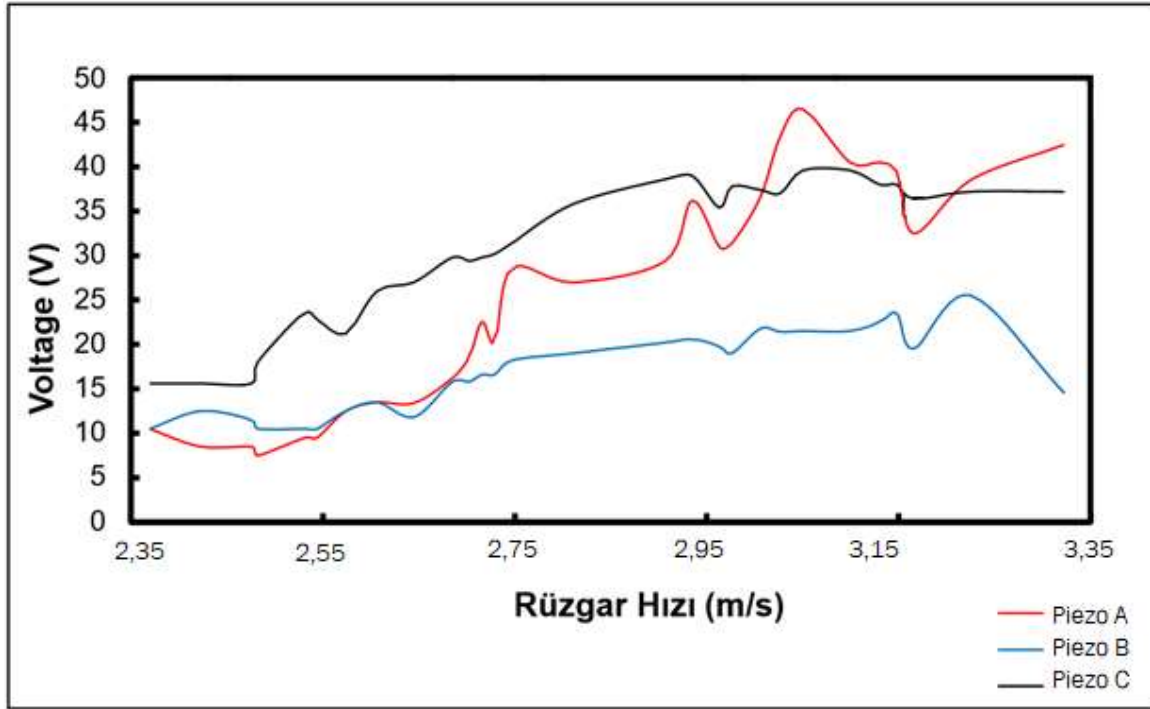
Şekil 4.10. Rüzgar tüneli denemelerinde üç piezoelektrik levhadan alınan gerilimler: Her birinden $V_{pp}=60V$, $V_{pp}=48 V$ ve $V_{pp}= 22 V$ maksimum değerlerine ulaşan dalga formları elde edilmiştir (Rüzgar hızı $u= 3.4 \text{ m/s}$)

Görüldüğü gibi eksen mıknatıslarının birbirlerine 120 derece ile konulması durumunda elde edilen dalga formları maksimumları neredeyse aynı zamana denk gelecek şekilde dalga formu oluşturmaktadır. Ancak manyetik akının hızlı değişmesi sonucunda ve eksenindeki plastik koruyucuya çarpmadan dolayı yüksek frekans harmonikler dalga formuna eklenmektedir. Ancak yine de daha uzun zaman zarfında incelendiğinde Şekil 4.11’de de görüldüğü gibi periyodik dalga formları görülmektedir.



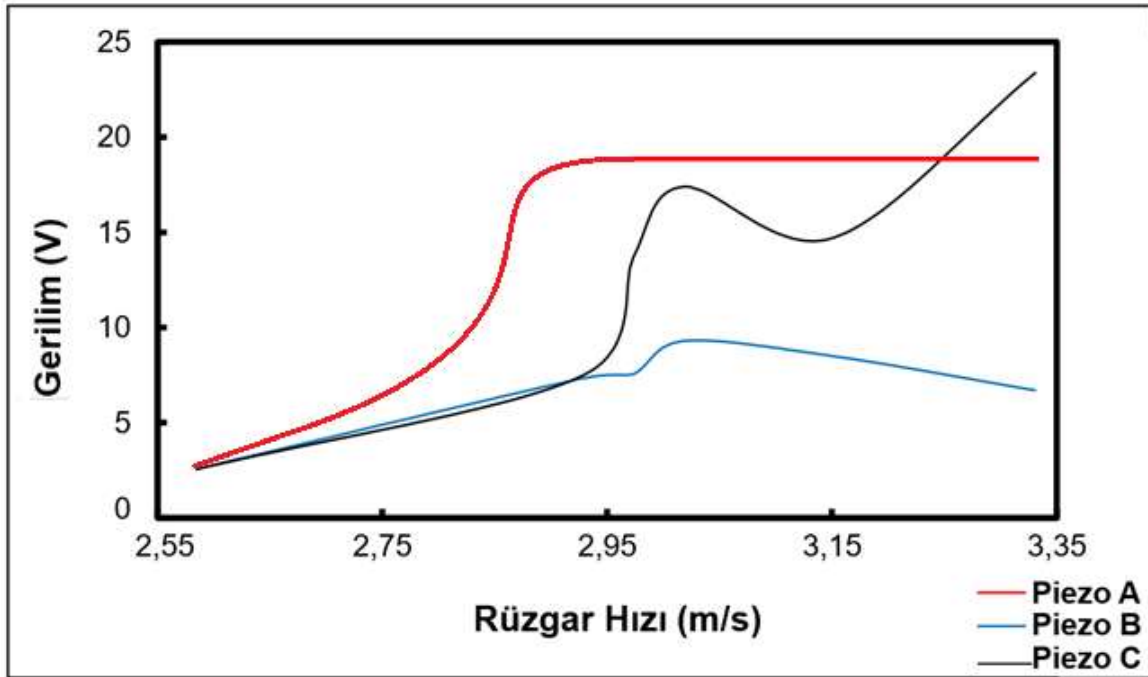
Şekil 4.11. Rüzgar tüneli denemelerinde üç piezoelektrik levhadan alınan gerilimler ($u= 3.4$ m/s.)

Farklı rüzgar hızlarında bu dalga formlarının maksimum genliklerinin Şekil 4.12’de verildiği gibi bir sonuç ortaya çıkardığı görülmektedir. Bu gerilim sonuçları, levhaların açık uçlarından elde edilen değerlerdir. Bu değerlere göre 10 V ile 47 V aralığında maksimum pik gerilimi mevcuttur.



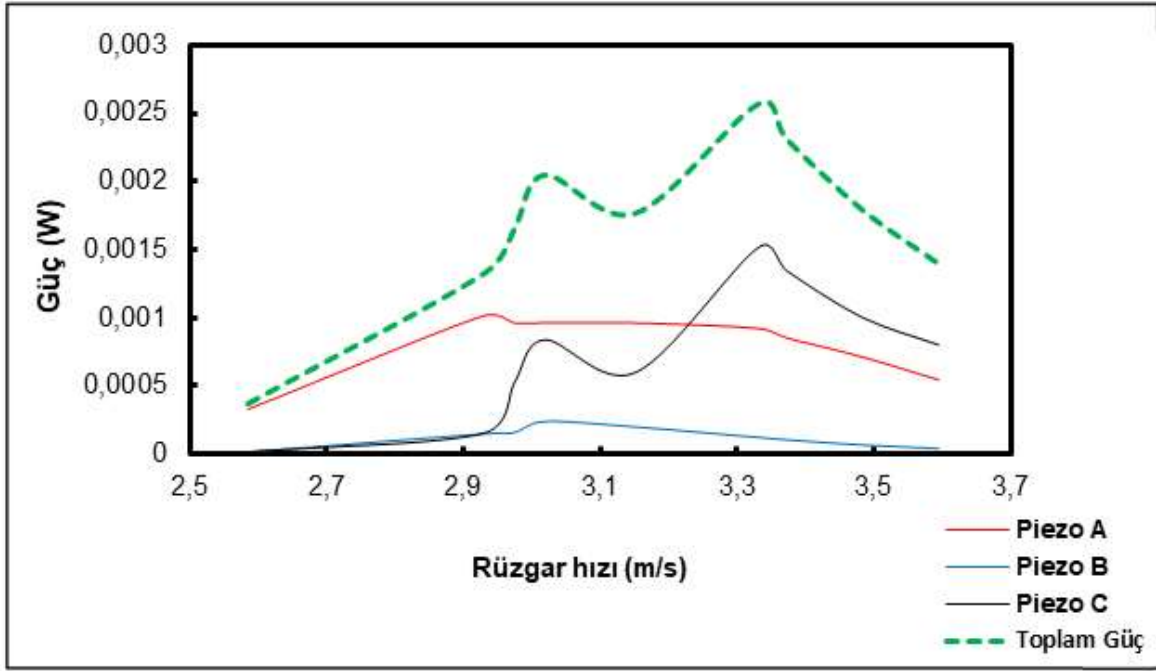
Şekil 4.12. Üç piezoelektrik levhanın rüzgar hızlarına göre ürettiği maksimum açık uç gerilimleri

Maksimum gücün elde edildiği 360 Kohm omik yük altında ise gerilimlerin hıza göre değişimi Şekil 4.13'te gösterilmektedir. Burada gerilimlerin kısa ve orta boydaki levhalar için genellikle benzer trende sahip olduğu gözlenirken uzun levha için doğal frekansa bağlı etkiden dolayı iki tepe noktası göze çarpmaktadır. Bu duruma titreştirici ile açık uç gerilimi ölçümlerinde de karşılaşılmıştır.



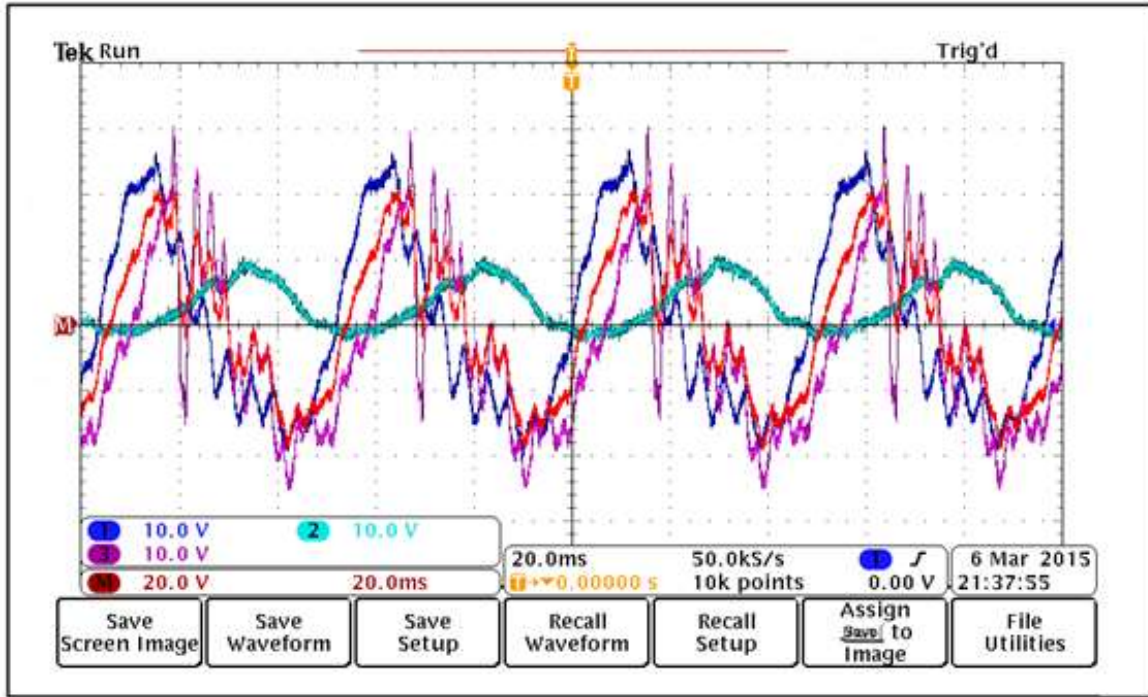
Şekil 4.13. Üç piezoelektrik levhanın rüzgar hızlarına göre ürettiği maksimum gerilimler (360 Kohm yük için)

Bu grafiğe göre kısa levhanın (Piezo A) gerilimi 3 m/s civarında sabitlenirken orta uzunluktaki (Piezo B) piezonun gerilimi az bir düşüşten sonra artış yapmaktadır. Bunun yanında uzun levhanın gerilimi ise hafif bir düşüş yapmaktadır. Şekil 4.14'de hıza göre elde edilen gücün değişimi verilmektedir. Buna göre A, B ve C levhaları 1 mW, 0.3 mW ve 1.5 mW civarında güçler üretmektedir. Bunların toplamı ise 2.7 mW'lık gücün 3.35 m/s hız için elde edilebileceğini göstermektedir. Diğer yandan 3,7 m/s'ye doğru doğal frekanstan ayrılma sebebiyle güçte düşüş gözlenmektedir. Bu değer üzerine piezoelektrik levhaların frekansa bağlı sert bükülmelerden dolayı kırıldığı görülmüştür. Bu sebepten daha yüksek rüzgar hızlarında çalışma sonuçları alınamamıştır.



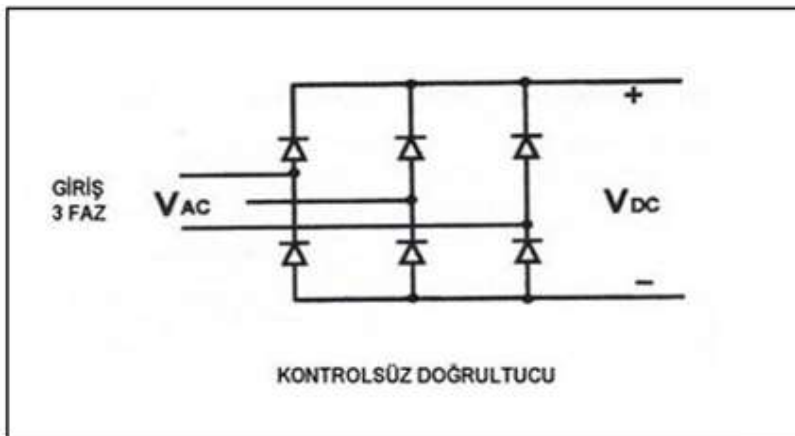
Şekil 4.14. Rüzgar hızına göre levhalarda elde edilen güçler ve toplam güç ($R=360 \text{ Kohm}$)

Yukarıda elde edilmiş dalga formlarına bakıldığında (*bakınız: Şekil 4.10 ve 4.11*), yüksek derecede harmonikleri olduğu görülecektir. Bunun bir örneği de Şekil 4.15’de gösterilmiştir. Bu sebepten dolayı yüksek harmonikli dalga formlarının önce doğrultulması ve şayet bataryada veya süper kapasitörde depolanacaksa buna uygun dönüştürücü elektrik devresi hazırlanması gerekmektedir.



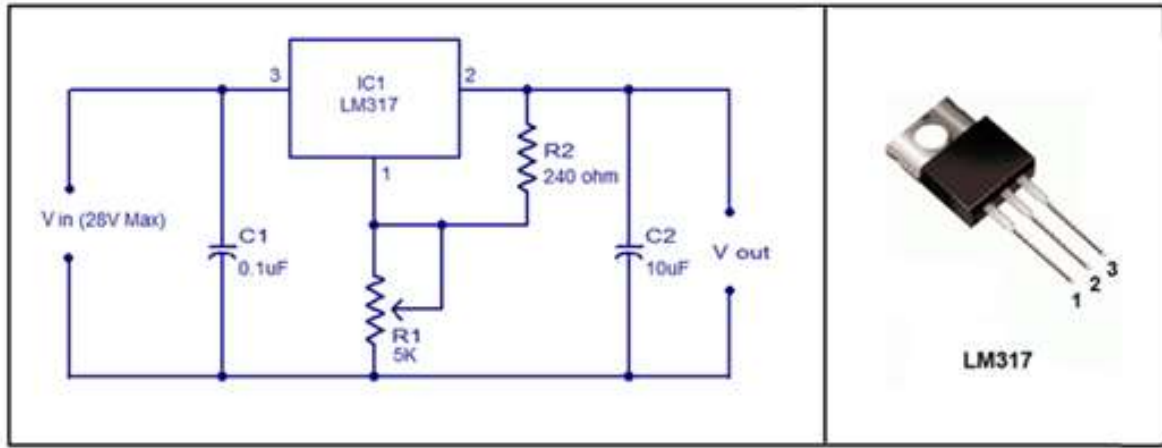
Şekil 4.15. Üç piezoelektrik levhadan üretilen çıkış sinyalleri

Elde edilen enerjinin doğrultma ve depolama çalışmaları için öncelikle Şekil 4.16'deki devre şemasına uygun olarak kontrolsüz doğrultucu girişleri üç farklı piezoelektrik levhanın çıkışına bağlanmıştır. Sonrasında ise bir enerji kontrol devresi ya da bir DC-DC dönüştürücüye aktarılmıştır. Son olarak elde edilen ve istenen gerilim seviyesine dönüştürülen sinyal şarj edilebilir bir pile ve yüke bağlanmıştır.



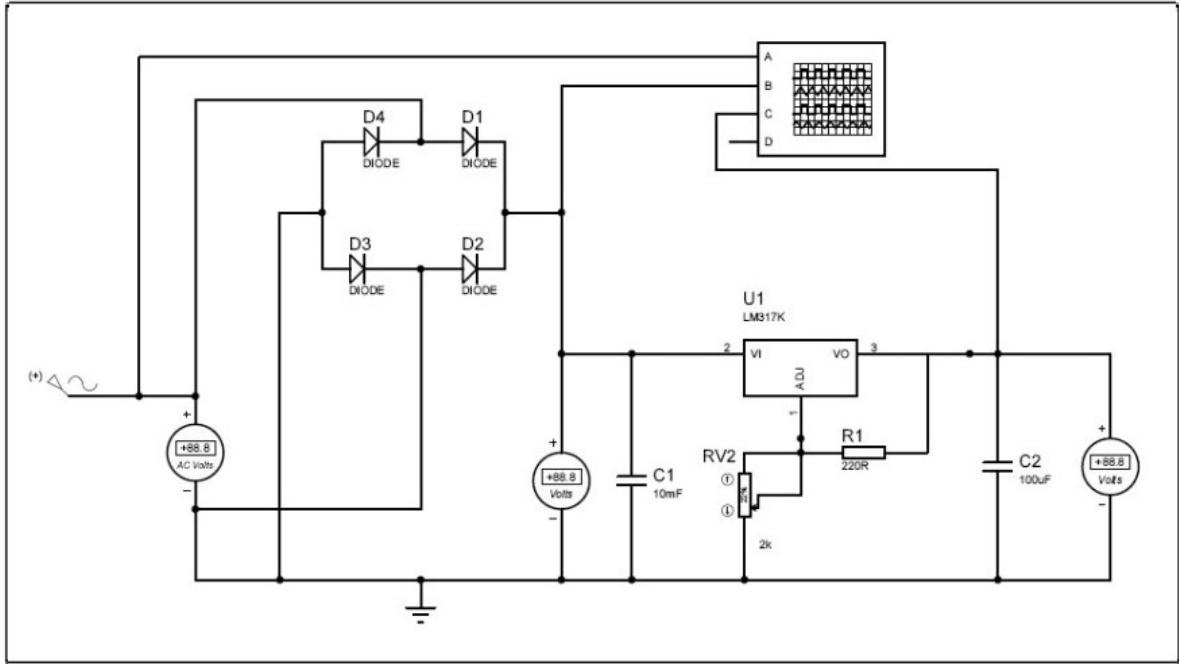
Şekil 4.16. Üç piezoelektrik levha çıkışı için kontrolsüz doğrultucu

Şekil 4.17’de LM317 entegresi kullanılarak yapılan DC-DC dönüştürücü devresi görülmektedir. LM317 ayarlanabilen gerilim regülatörü olarak çalışan 1,5 A çıkış akımı verebilen bir devre elemanıdır. Bu entegre ile yapılan uygulamada değişken giriş gerilimlerine rağmen sabit gerilim alınması hedeflenmiştir. Devrede bulunan potansiyometrenin görevi, farklı uygulamalarda ihtiyaç duyulabilecek farklı gerilim seviyelerine uygun gerilim ayarı yapılmasıdır. Devre uygulamasında 0,01V hassasiyetinde sabitleme yapılabilmektedir. DC / DC dönüştürücü olarak kullanılan çeşitli entegreler mevcuttur. Örneğin LM7805, LM7812 gibi. LM317’nin tercih edilme sebebi çıkış geriliminin entegre içinden ayarlanabilmesidir. Entegrenin 1 nolu bacağına bağlanan 5 kOhm’luk potansiyometre gerilim ayarı yapılmasına imkân vermektedir.

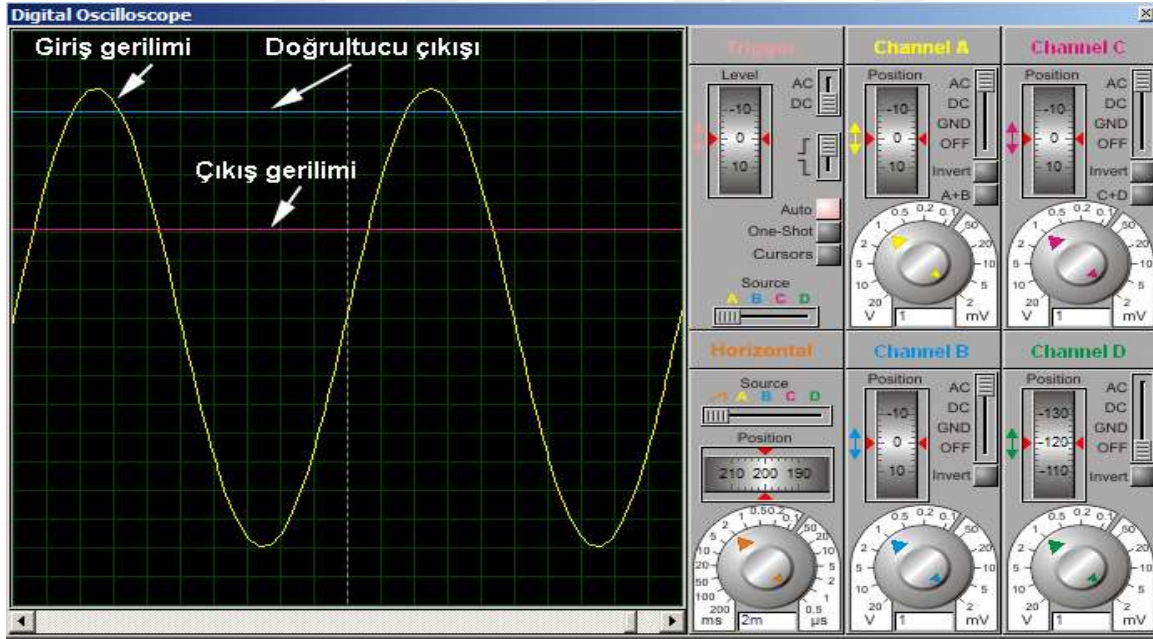


Şekil 4.17. (a) LM317 entegresi ile dc/dc dönüştürücü diyagramı, (b) pin isimleri [25]

Elde edilen alternatif sinyalin doğrultulması ve kullanılabilecek seviyeye getirilebilmesi için öncelikle Proteus yazılımı kullanılarak doğrultucu ve doğrultucu çıkışına da DC-DC dönüştürücü eklenmiştir. Bu çalışma Şekil 4.18’de gösterilmiştir.



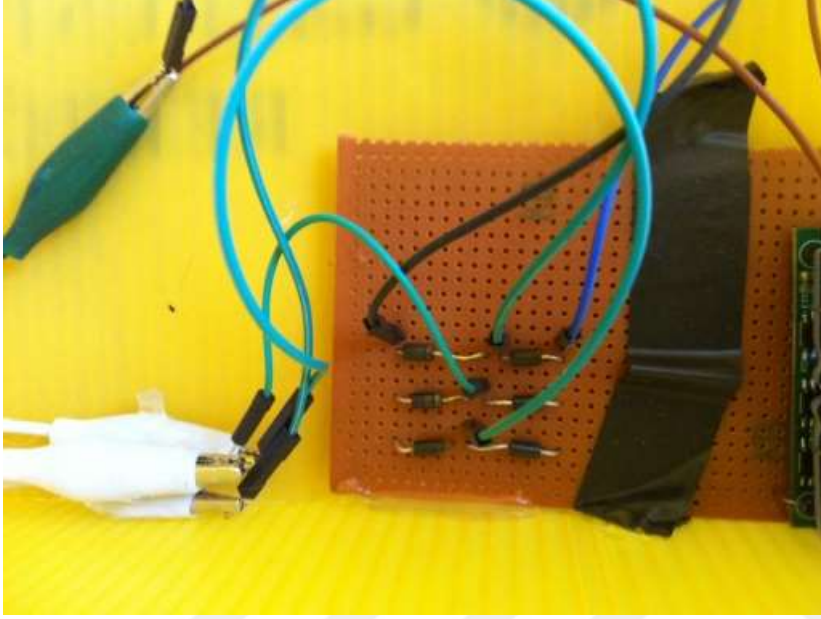
Şekil 4.18. Proteus programında gerçekleştirilen doğrultucu ve DC-DC dönüştürücü devre



Şekil 4.19. Proteus programında gerçekleştirilen doğrultucu ve DC-DC dönüştürücü devre

Şekil 4.18’de gösterilen devreye ait sinyaller Şekil 4.19’da gösterilmiştir. Burada, elde edilen alternatif sinyal önce doğrultucuya uygulanıp doğrultulduktan sonra DC-DC dönüştürücüye uygulanır. Bu sayede gerilimin büyüklüğü ne olursa olsun çıkıştan alınacak gerilim seviyesi sabitlenmiş olur. Örneğin bizim deneysel sistemimizde 3 V’luk bir buton pil kullanılmıştır. Dolayısıyla DC-DC dönüştürücü üzerinde bulunan potansiyometre yardımıyla çıkış

geriliminin 3 V olması sağlanmıştır. Bu sistem sayesinde elde edilen enerji farklı gerilim seviyelerine sahip birçok cihazda kullanılabilir. Yukarıdaki sistem, benzetim işlemlerinden sonra deneysel olarak da gerçekleştirilmiştir. Doğrultucu devreye ait fotoğraf ise Resim 4.6’te gösterilmiştir.



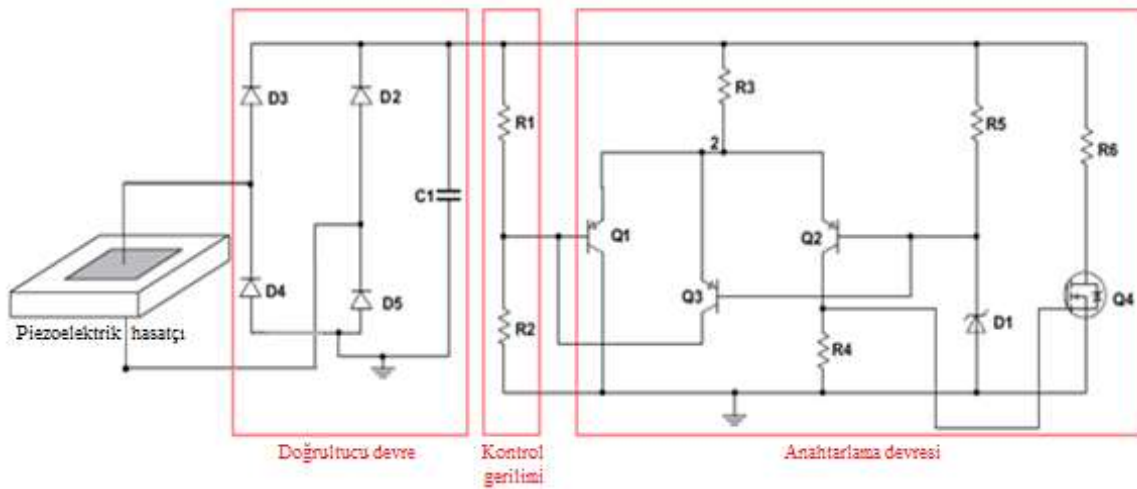
Resim 4.6. Üç piezoelektrik levha çıkışı için kontrolsüz doğrultucu ünitesi uygulaması

Bu devreden elde edilen çıktı, Resim 4.7’de gösterilen ve ticari bir ürün olan enerji kontrol devresine bağlanmıştır. Buna ek olarak, yine farklı çalışmamızla tasarladığımız DC-DC dönüştürücü ile de çıkış gücü testleri yapılacaktır.



Resim 4.7. Enerji kontrol devresi

Resim 4.7’deki enerji kontrol devresi enerji depolayan üniteyi de içeren, DC/AC ve DC/DC eviriciler içeren bir devredir. Buradaki asıl amacımız 3,2 V değerinden daha az üretim yapılması durumunda enerji üreteç devresinin çıkışının kapatılması, diğer hallerde ise yüke enerji aktarımında bulunulmasıdır. Devrenin bağlantı şeması Şekil 4.20’de, temel özellikleri ise Çizelge 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.20. Enerji kontrol devresi devre şeması [26]

Çizelge 4.1’de EH301A enerji üreteç devresine ait parametreler gösterilmiştir. Bu çizelgeye göre kullanılabilir enerji çıkışı asgari 55 mJ olurken, düşük ve yüksek gerilim seviyeleri 3,1 V ve 5,2 V olarak tanımlanmıştır.

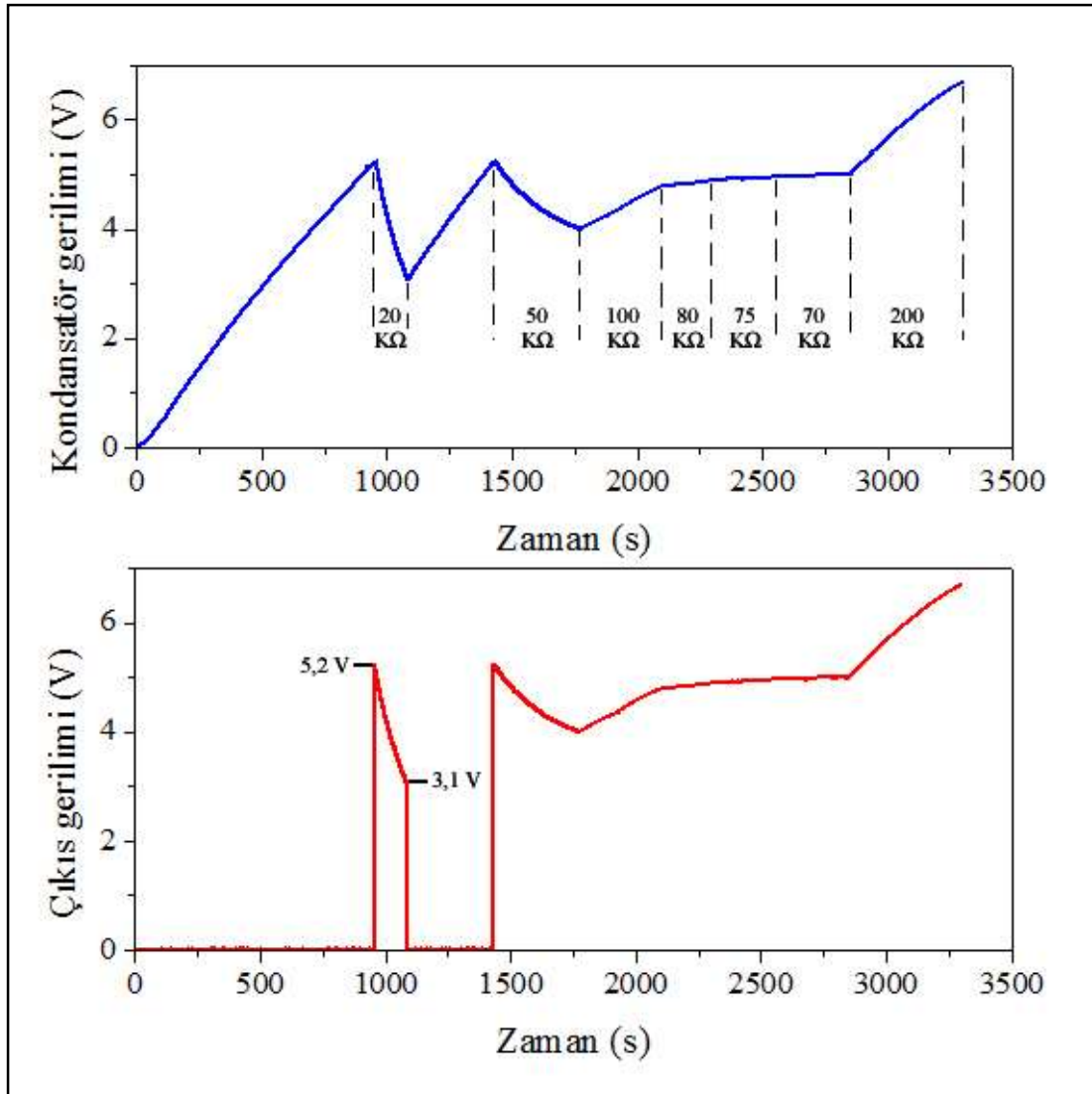
Çizelge 4.1. Enerji üreteç devresi özellikleri [27]

Paramaeter	EH301A			Unit	Test Conditions
	Min	Typ	Max		
Output Low Level		3,1		V	
Output High Level		5,2		V	
Charging Input	6.0/300			V@nA	
Power Dissipation		1,5	3	mW	
Useful Energy Output		55		mJ	1 cycle
Output On-time Rating		885/150		msec@mA	1 cycle
V _P Output Resistance		0,1		Ω	V _P = 5,0V
V _R Output Sink Current		5		mA	V _P = 5,0V V _R = 5,0V
V _R Output Source Current		-2		mA	V _P = 5,0V V _R = 0,0V
Output Load	5			Ω	I _{out} = 1A
Output Current			1	A	R _{load} = 5,0Ω

Enerji üreteç devresinin maksimum giriş gerilimi ± 500 V ’tur [27]. Ani ve yüksek genlikli titreşimlerde piezoelektrik levha uçlarında çok yüksek gerilimler görülebilmektedir. Dolayısıyla giriş gerilim seviyesinin yüksek olması devrenin zarar görmemesi açısından büyük bir avantaj oluşturur. Bu durum çok küçük sinyallerden enerji elde edilmesine bir engel oluşturmamaktadır. Yine enerji üreteç devresinin çalışma sıcaklığı 0-70 °C olarak verilmiştir [27]. Elektronik devre çalıştığından dolayı (akım geçtiğinden dolayı) ortam sıcaklığına göre daha yüksek ısı seviyesine sahip olacaktır. Örneğin ortam sıcaklığı -10 °C olsa bile devrenin sıcaklığı 0 °C’nin üzerinde olacaktır. Nitekim Ankara şartlarında ortam sıcaklığı -3 °C iken yapılan deneysel çalışmalarda sistemin sorunsuz olarak çalıştığı görülmüştür. Enerji üreteç devresinin katalogunda [27] maksimum güç kaybının 3 mW olduğu belirtilmiştir. Bizim çalışmamızda elde edilen güç 80 mW olduğu durumda devre veriminin %96’nın üzerinde olduğu görülmüştür.

Şekil 4.21’de enerji üreteç devresi kullanılarak yapılan bir uygulamada, üretecın kondansatör gerilimi ve çıkış (yük) gerilimi gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi

yaklaşık 15 dakika sonunda devre üzerindeki gerilim 5,2 volt seviyesine ulaşmış ve eleman yükü beslemeye başlamıştır. Bu andan itibaren devre çıkışına 20 K Ω değerinde bir yük bağlanmış bu yük yaklaşık 2 dakika sonunda kondansatör geriliminin 3,1 volta düşmesine neden olmuştur. Dolayısıyla bu andan itibaren devre çıkış vermemeye başlamıştır. Devrenin kondansatör gerilimin tekrar çıkış verebilmesi için gerekli olan 5,2 volt seviyesine çıkabilmesi yaklaşık 6 dakika sürmüştür. Bu andan itibaren devre çıkışındaki yük değeri değiştirilerek elde edilen güç bulunmaya çalışılmıştır.



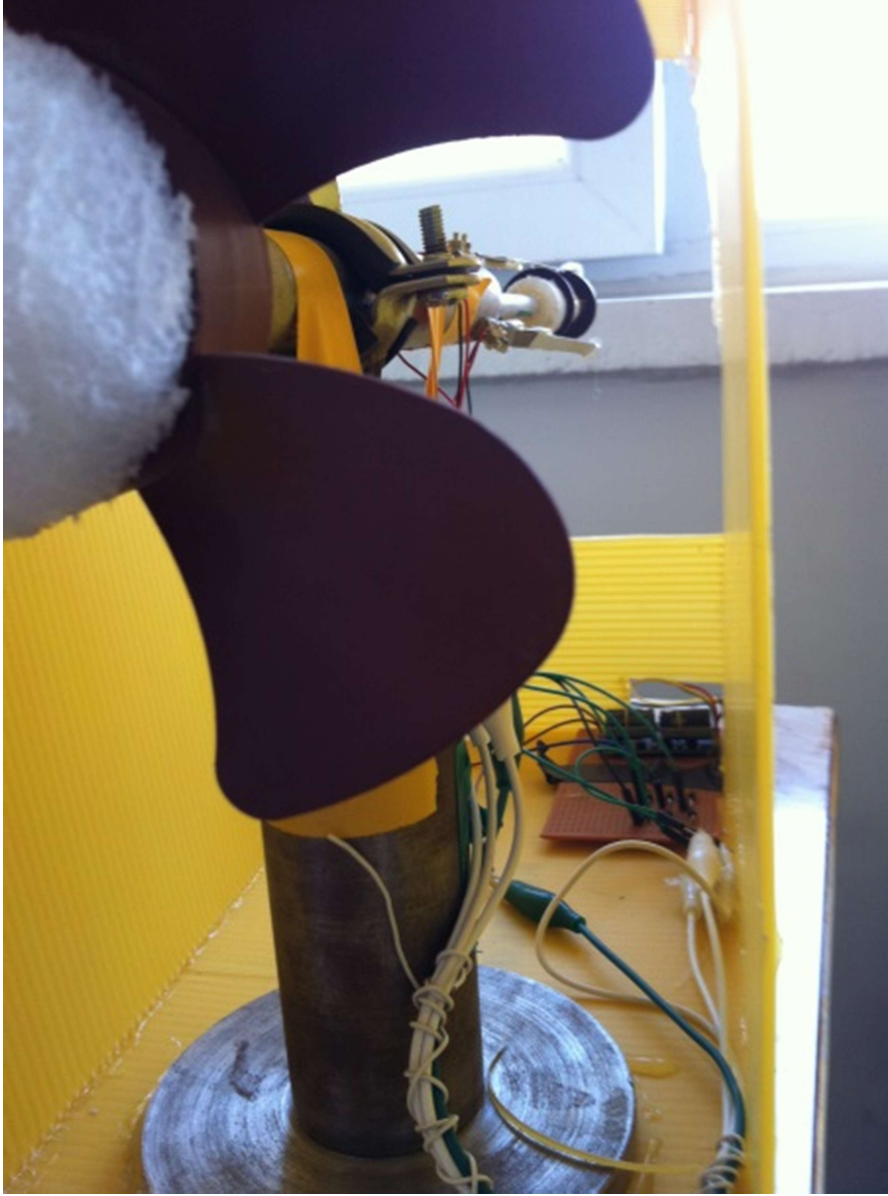
Şekil 4.21. Zamana bağlı olarak farklı yükler için enerji üreteç devresinin kondansatör ve çıkış gerilimleri

Enerji depolama ve regülasyon devresine ait Çizelge 4.1'de verilen özelliklere göre Şekil 4.21'de 20 K Ω direnç bağlı iken kondansatör gerilimi 3,1 voltun altına düştüğü anda çıkış

gerilimi sıfır olmaktadır. Yani devre üzerindeki enerji miktarı düştüğü anda sistem çıkış vermeyerek enerjinin birikmesini sağlamaktadır. Bu durum devrenin tasarım özelliği ile ilgilidir.

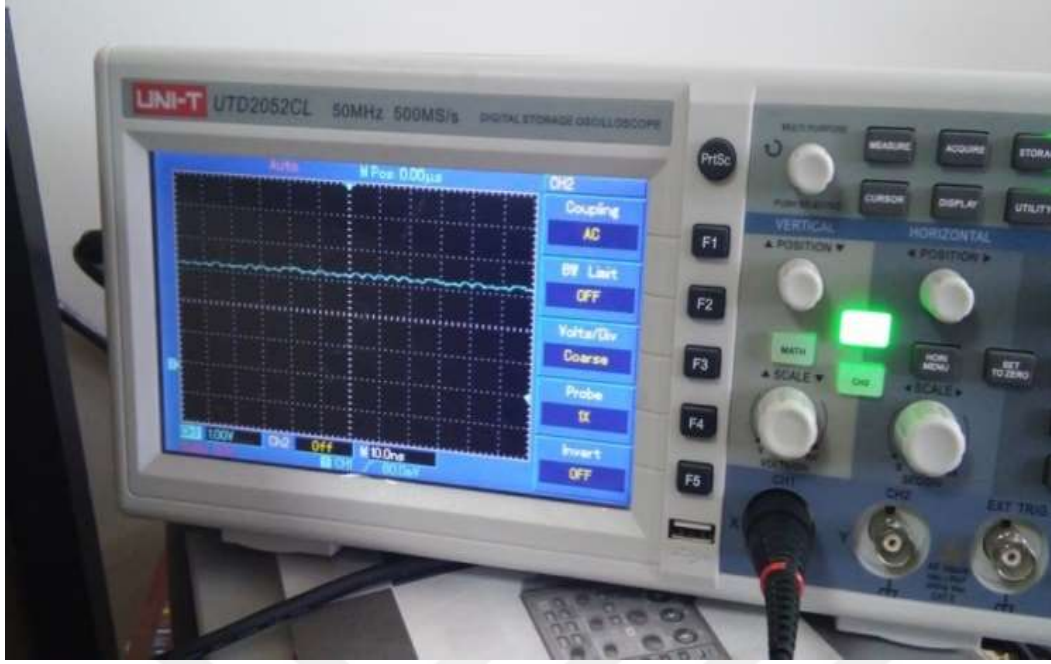
Devre 5,2 ile 3,1 volt arasında çıkış vermekte iken eğer yükte harcanan enerji miktarı üretilen enerjiden fazla ise grafik aşağı yönlü, harcanan enerji üretilen enerjiden az ise grafik yukarı yönlü olacaktır. Eğer üretilen ve yükte harcanan enerji birbirine eşit ise grafik paralel doğrultuda olacaktır. Yapılan çalışmada çeşitli yük değerleri devreye alınarak bu paralelliğin bulunduğu yük direnci değeri tespit edilmeye çalışılmıştır.

Yaklaşık 70 K Ω yük direncinde, 4,97 volt gerilim ve 70 mA seviyesinde bu paralellik yakalanmıştır. Yani bu değerlerden çıkış gerilimi sabitlenmiştir. Dolayısıyla devre çıkışına 70 K Ω 'luk yük bağlı iken üretilen ve harcanan enerji miktarları dengededir.



Resim 4.8. Piezoelektrik rüzgâr enerjisi hasatçısının mekanik ve elektronik üniteleri toplu halde

Resim 4.8’de bütün mekanik ve elektronik üniteleriyle piezoelektrik rüzgâr enerjisi üretici gösterilmiştir. Ön kısımda yer alan mekanik rotasyonu sağlayan kanatçıklar mil ile mıknatısları çevirmekte olup her üç piezoelektrik levhanın mekanik titreşimi temassız halde sağlanmaktadır. Üretilen gerilim ise önce 3 fazlı kontrolsüz doğrultucuya daha sonra da enerji üreteç devresine yönlendirilmektedir.



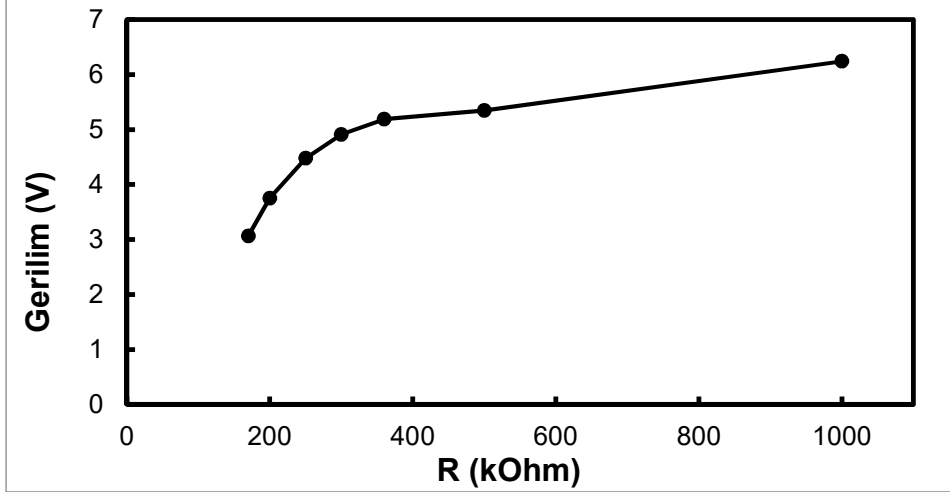
Resim 4.9. Doğrultulmuş faz sinyali

Resim 4.9’da 3.2 V’luk doğrultulmuş DC sinyali osiloskoptan görülmektedir. Bu sinyal, enerji üreteç devresinin yük çıkışına yük bağlandıktan sonra alınmıştır. Yine Resim 4.10’da sayısal multimetre ile enerji üreteç devresinden alınan çıkış gerilimi dc olarak verilmektedir.

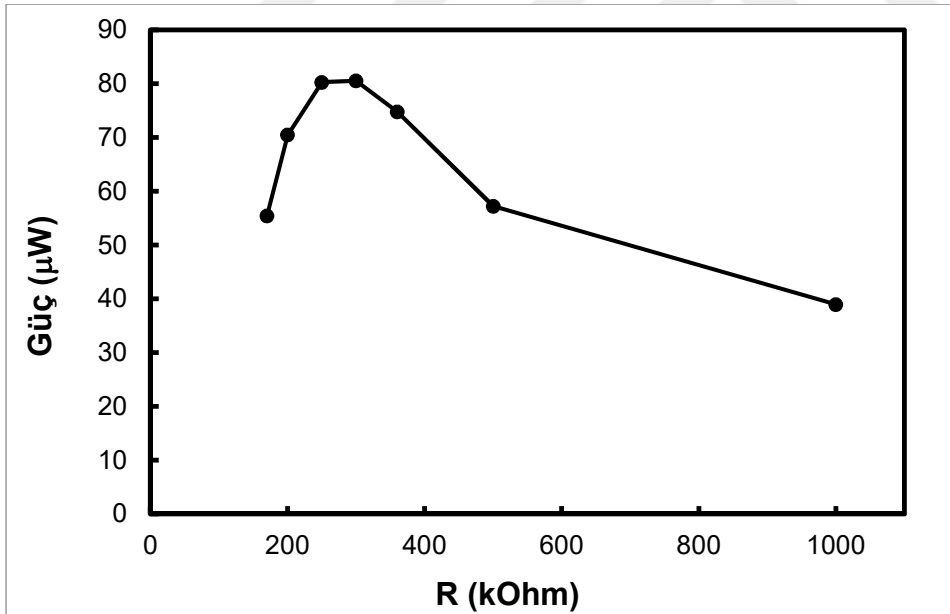


Resim 4.10. Yük çıkışının sayısal multimetre çıkışından gözlenmesi

Yük üzerine verilen ve devre çıkışından elde edilen gerilimler, ayrıntılı olarak farklı rüzgâr hızlarında da test edilmiştir. Buna göre Şekil 4.22(a) oluşturulmuştur.



(a)



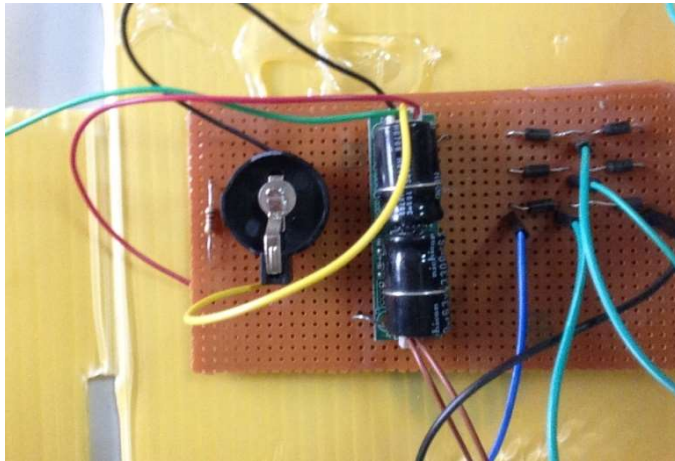
(b)

Şekil 4.22. Yüke bağlı (a) gerilimlerin ve (b) güç değerlerinin ticari üreteç devresi çıkışından eldesi

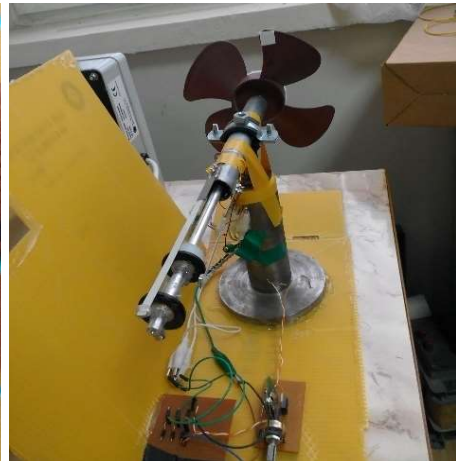
Bu ayrıntılı cihaz çıktısına göre çıkış gerilimi $1 \text{ M}\Omega$ 'a kadar artış gösterirken, $0.3 \text{ M}\Omega$ civarında geçici bir sabit gerilim platosu gözlenmiştir. Yine Şekil 4.22(b)'deki güç değerlerine bakıldığında ise $0.4 \text{ M}\Omega$ civarında maksimum çıkış gücünün elde edildiği

görülmektedir. Bu durum yalnızca piezoelektrik terminallerine doğrudan yük bağlayarak yaptığımız çalışmadan farklılık göstermektedir. Çünkü yalnızca piezoelektriğe bağlanan yük ile yapılan çalışmada, yalnızca piezoelektriklerin kendi iç empedansından dolayı oluşan etki güce yansımaktadır. Ama gerçekte, piezoelektriklerin çıkışına eklenen üreteç devresi de depolama özelliği içermesinden dolayı, belli bir empedans değişikliği yapmaktadır. Bundan dolayı cihaz çıkışının $0,4 \text{ M}\Omega$ dolaylarında maksimum güç verdiği ölçülmüştür. Elde edilen gücün 82 mW dolaylarında olduğu tespit edilmiş olup bu güç yaklaşık $2,5 \text{ m/s}$ 'lik rüzgar hızında elde edilebilmiştir. Pek çok geleneksel elektromanyetik rüzgâr enerjisi türbininin bu hızlarda dönmediği bilindiğinden, düşük güç gereksinimi olan cihazlara bu tarz bir üretimin bağlanması, düşük rüzgâr hızlarında bile, yenilenebilir kaynaklardan elde edilen bir enerji olarak avantajlı bir durum oluşturduğu görülmektedir.

Resim 4.11'de piezoelektrik levha uçlarından alınan alternatif düzgün olmayan sinyal doğrultucuya uygulanmış, doğrultucu çıkışı da sabit bir gerilim elde etmek amacıyla ticari üreteç devresine ve kendi ürettiğimiz DC-DC dönüştürücüye uygulanmıştır. Sisteme bağlanan ve etiket değerleri Çizelge 4.2'de gösterilen şarj edilebilir pil 3 V gerilime sahip olduğundan DC-DC dönüştürücünün çıkış gerilimi potansiyometre kullanılarak 3 V 'a ayarlanmıştır. Pil çıkışına da yük olarak direnç bağlanmıştır.



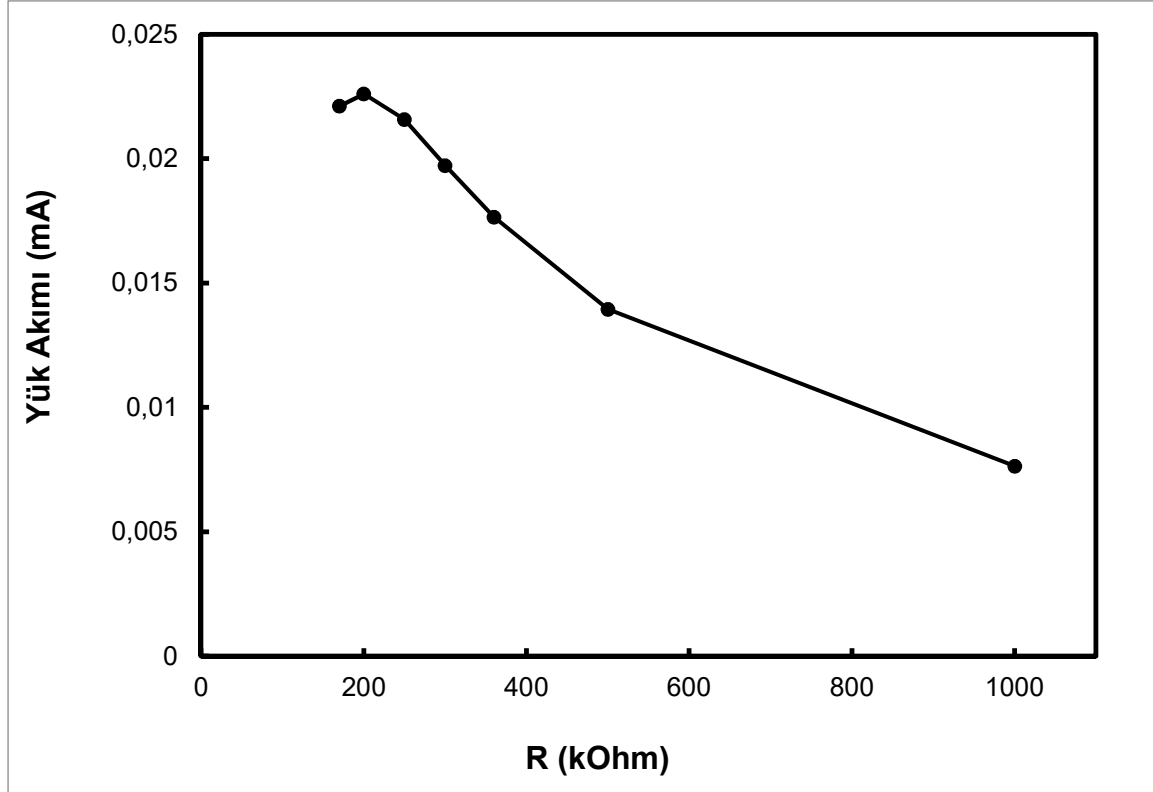
(a)



(b)

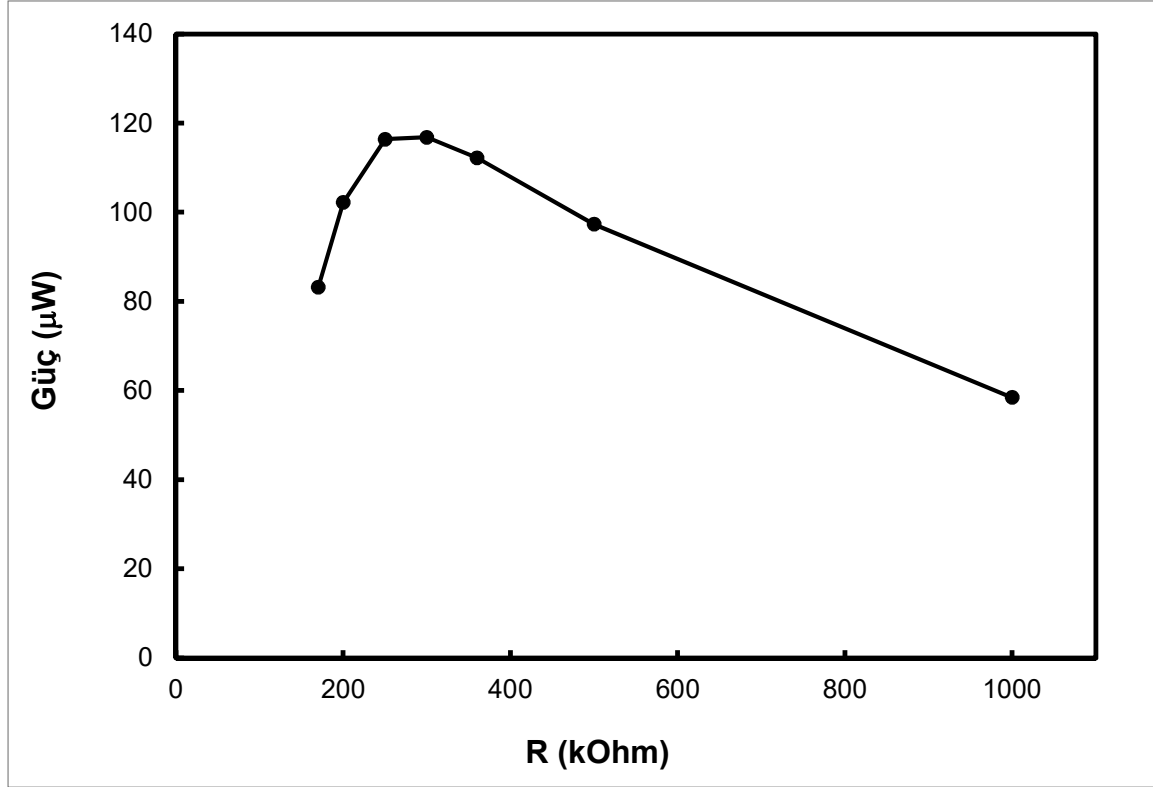
Resim 4.11. (a) 3 faz doğrultucu, ticari dönüştürücü ve pil ile beraber elektronik sistemin genel görünümü, (b) ticari üreteç yerine bizim yaptığımız DC-DC dönüştürücü kullanılan deney görünümü

Resim 4.11(b)'de, Şekil 4.18-4.19'da tasarladığımız DC-DC dönüştürücünün 3 fazlı doğrultucu çıkışına eklenerek batarya şarjı için kullanımı incelenmiştir. Şekil 4.23, farklı çıkış yükleri için tasarladığımız DC-DC dönüştürücünün akım ve güç çıktılarını vermektedir.



(a)

Şekil 4.23. Çıkışa yük bağlı iken (a) akım ve (b) çıkış güç değerlerinin dc-dc doğrultucu devresi çıkışından eldesi



(b)

Şekil 4.23. (devam) Çıkışa yük bağlı iken (a) akım ve (b) çıkış güç değerlerinin dc-dc doğrultucu devresi çıkışından eldesi

Şekil 4.23(a)'da yük akımı farklı dirençler için gösterilmiştir. Eğriye göre maksimum akım çekilen nokta $R = 360 \text{ kOhm}$ 'da görülürken bu sonuç güçte de ayrıntılı olarak görülmüştür (Şekil 4.23(b)). Yükün daha büyük değerinde çekilen güç azalmaktadır.

Sistemde kullanılan pil 3 V olarak seçilmiştir. Enerji üreticinin besleyeceği cihazın gerilimi dikkate alınarak seçilecek pilin uygun değerde olması gerekmektedir. Ayrıca pilin şarj edilebilir olması gereklidir.

Çizelge 4.2. Sistemde kullanılan şarj edilebilir pilin özellikleri

Gerilimi	Kapasitesi	Boyutları	Ağırlığı	Ç.Sıcaklığı
3 V	1,2 mAh	4,8x1,45 mm	0,9 gr	-20 / +60 °C

Tasarlanan ve prototip imalatı gerçekleştirilen sistem Resim 4.12'de gösterildiği gibi Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği bölümünün çatısına

yerleştirilmiş ve örnek olarak 12 K Ω 'luk bir direnci beslemesi sağlanmıştır. Pil tam şarjlı halde iken ve enerji üretici bağlı değilken gerilim çok fazla değişmeden yaklaşık olarak 1 saat 22 dakika besleyebilmiştir. Çok rüzgârlı olmayan bir günde enerji üreteç devresi de bağlandığında bu süre yaklaşık olarak 1 saat 35 dakika olmuştur. Bu durumda pilin kullanım ömrü yaklaşık olarak %16 oranında artmıştır. Bu artışın, daha düşük güç harcayan sistemlerde ve daha yüksek rüzgâr hızlarında daha büyük olacağı açıktır.



Resim 4.12. Sistemin saha şartlarında test edilmesi (Ticari üreteç devresi ile doğrultucu devre ile)

Cihazın çalışması için gereken optimum koşullar ise aşağıdaki Çizelge 4.3'te özetlenmiştir.

Çizelge 4.3. Piezoelektrik rüzgar enerjisi üreticinin optimum çalışma parametreleri

Çalışma Sıcaklığı (°C)	Rüzgar Hızı (m/s)	Maksimum Çıkış Gücü (mW)
-10°C - 60	2.9 - 3,6	120

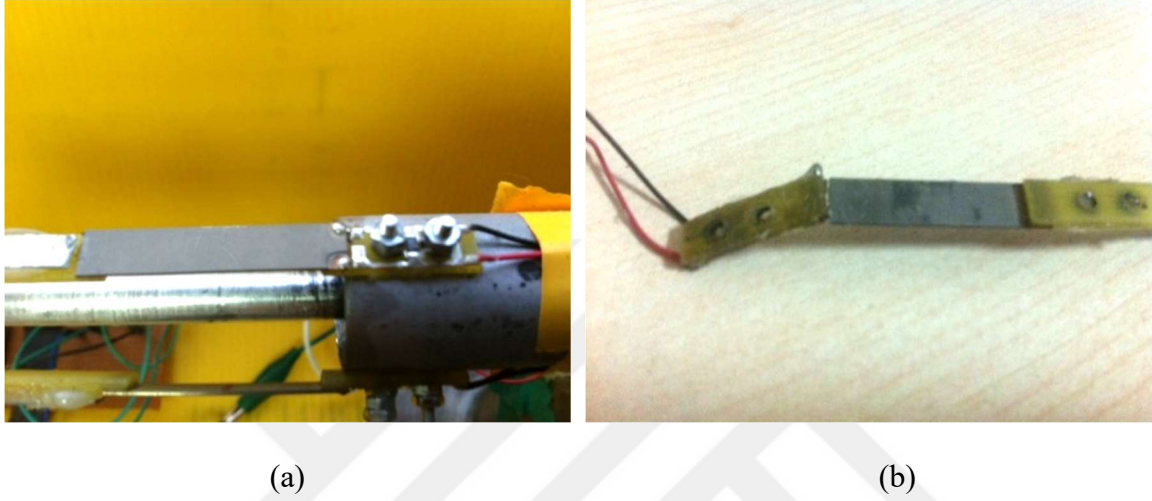
Buna göre işlevsel özellikler kesinleştirilmiştir. Rüzgar hızının 3,4 m/s'den büyük olması durumunda levhaların aşırı titreştiği ve levhalarda kırılmalar olduğu gözlenmiştir. Bu durumda optimum hız için 3,4 m/s'nin üzerine çıkmak bu esneklikteki piezo malzemeler için olası değildir. Yüksek hızlarda kırılmış piezoelektrik levhanın görüntüsü Resim 4.13'de verilmiştir.



Resim 4.13. Rüzgâr hızının 3.4 m/s'den büyük olduğunda piezoelektrik levhada oluşan kırılma

Bu proje kapsamında incelenen diğer bir husus, piezoelektrik levhaların mekanik temas altında çalıştığında ve manyetik temas altında çalıştığında ömürlerinin ne kadar uzadığının araştırılmasıdır. Yaptığımız deneylerde eksendeki mıknatısla piezoelektrik levhanın üzerindeki mıknatısın etkileşmesi sonucu oluşan itici manyetik kuvvetin, devamlı çalışma durumunda, mekanik temaslı titreşen sistemlere göre büyük avantaj sağladığıdır. Örnek olarak yaptığımız bir çalışmada; mekanik temaslı piezonun ömrünün yaklaşık 63 gün olduğu saptanmıştır. Bu üreteç sisteminde, kanatçıkların sağladığı dönme yönü, piezoelektrik

levhanın titreşim yönüne dik olmasından dolayı, mekanik temaslı durumda literatüre göre oldukça mekanik dayanım gösterdiği belirlenmiştir. Ancak 42'inci günde levhanın eksene takılı yerinde hafif eğilme oluşmuş ve daha sonra bu durum aşırı hal alıp, eklem yerinden levha kopmuştur. Manyetik etki ile kullandığımız sistem ise halen çalışmaktadır. Herhangi bir kırılma görülmemektedir.



Resim 4.14. (a) Manyetik etki altına çalışan kırılmamış ve (b) mekanik temasla kırılan piezoelektrik parçaların durumları

Bu sebepten, farklı bir proje çalışmasıyla, bu üretcin hız kontrolünün sağlanarak yüksek hızlarda frenleme yapmasını sağlayacak yenilikçi bir sistemin tasarım ve üretiminin yapılması düşünülmektedir.



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu projede yenilikçi temassız bir rüzgâr enerjisi hasatçısı tasarlanıp prototipi üretilmiştir. 3 boyutlu elektromanyetik benzetimlerle mıknatısların oluşturduğu manyetik akı yoğunlukları B bulunmuş, bu manyetik akı yoğunluğunun, piezoelektrik levhayı kırmayacak şekilde hava aralığına yerleştirilmesi gerçekleştirilmiştir. Hava aralığının çok küçük olması levhaları manyetik kuvvet etkisinde çok bükeceğinden, optimum bir aralık belirlenmesi önem arz etmektedir. Levhalar, farklı boylarda oluşturularak 3 farklı doğal frekansta titreşmesi öngörülmüştür. Bu frekanslar sırasıyla, $f = 8.6$ Hz, 10.3 Hz ve 11.7 Hz olarak ölçülmüştür. Böylece 8.6 Hz ile 11.7 Hz aralığındaki güç üretimi 3 katı kadar artırılabilmiştir. Her bir piezoelektrik levhanın terminallerine elektriksel yükler bağlandığında maksimum çıkış gücünün 400 k Ω 'da maksimum olduğu görülmüş, ancak farklı titreşim frekanslarında bu yükün 300 k Ω 'a kadar düştüğü belirlenmiştir. Bu durumda; titreşim frekansının, optimum elektriksel yük değerini değiştireceği sonucuna varılmıştır. Yapılan deneylerde rüzgâr hızına bağlı olarak 7 V'dan 45 V tepe değerine kadar gerilim üretilebileceği bulunmuştur. Ancak kontrolsüz doğrultucu ve dönüştürücü devrelerinden sonra alınan maksimum gücün 120 mW civarında olacağı görülmüştür.

Elde edilen dalga formlarının harmoniğinin yüksek olduğu ve bu yüzden AC-DC çevirici sisteminin kullanılması gereğine dikkat çekilmiştir. Deneylerden elde edilen diğer önemli sonuç da 20 Hz üzerindeki titreşimlerin piezoelektrik levhaları kırabileceği, bu değerlerin altında çalışma gereğidir. Önerilen temassız sistemin, mekanik temas olmamasından dolayı piezoelektrik levhaların ömrünü uzattığı görülmüştür.

Sonuç olarak; tasarlanıp üretilen yeni piezoelektrik üreteç cihazının, mW ölçeğinde güç gereksinimi duyan kablolu sistemlerinin beslenmesinde kullanılabileceğinin uygun olacağı ispatlanmıştır. Diğer yandan; 2 m/s gibi düşük rüzgâr hızlarında dahi üretecin çalışabildiği sonucuna varılmış, geleneksel elektromanyetik üreteçlerden daha düşük rüzgâr hızlarında çalışabildiği görülmüştür.

Rüzgâr titreşimlerini ve piezoelektrik levhaları kullanarak elektrik enerjisi üreten sistem çok fazla yoktur. Proje ile gerçekleştirilen çoklu frekanslı sistem sayesinde daha önce yapılan tek piezoelektrik malzeme ile oluşturulan sistemlere göre [5] yaklaşık 3 katlık bir güç artışı sağlanmıştır. Bunun en önemli nedeni sistemde farklı doğal frekanslara sahip levhaların

kullanılmış olmasıdır. Daha önemlisi titreşim sistemlerinin hepsinde olduğu gibi pizeoelektrik enerji üreteç sisteminde de en önemli problem çok dar bir frekans aralığında enerji elde edilebiliyor olmasıdır. Önerdiğimiz sistem sayesinde birçok uygulamada 2-3 Hz aralığında olan etkin bir şekilde enerji elde edilebilen band genişliği, sunduğumuz sistem ile 6-7 Hz civarına çıkartılabilmektedir. Kısaca, daha sürekli frekans aralığında daha fazla güç elde edilebilmiştir.

Çalışmalar sonucunda, yeni bir temassız piezoelektrik enerji üreticinin tasarlanıp çalışır halde üretilmiş, ilaveten bütün testlerinin yapılması sağlanmıştır. Bu proje çalışması, TÜBİTAK Araştırma Destek Programları Başkanlığı (ARDEB)'nin 114E017 kodlu projesi olarak desteklenmiş ve kabul edilmiştir. Sonuçlar, akademik bir konferansta bildiri olarak sunulmuştur.

Bu projenin gerçekleştirilmesindeki diğer bir amaç da rüzgâr titreşimlerinden yararlanarak ve piezoelektrik levha kullanarak hangi şartlar altında ne oranda elektriksel güç elde edilebildiğinin tespit edilmesiydi. Bu proje ile tanımlanan amaç gerçekleştirilmiş olup tasarlanan sistem için optimum şartlar ortaya konulmuştur. Proje bir laboratuvar çalışmasıdır. Ancak sistem daha kompakt hale getirilerek zor doğa koşullarında çalışan kablosuz cihaz ve sensörlerin beslenmesinde ve/veya pil ömürlerinin artırılmasında da kullanılabilecektir.

Tasarlanıp üretilen prototipin, -5 °C ile 60 °C sıcaklık aralığında optimum çalışabilecek malzeme özelliklerine sahip olduğu; 2,9 ile 3,6 m/s'lik rüzgar hızlarında 360 kΩ altındaki elektriksel yüklerde optimum güç üretebildiği belirlenmiştir. Ancak bu değerlerden farklı parametrelerde de üreticinin 3,6 m/s altındaki rüzgar hızlarında çalışabildiği gözlemlenmiştir.

KAYNAKLAR

1. Vullers, R.J.M., Schaijk, R.V., Doms, I., Hoof, C.V., Mertens, R. (2009). Micropower energy harvesting. *Solid-State Electronics*, 53, 684–693.
2. Chen, J., Cao, X., Cheng, P., Xiao, Y., Sun, Y. (2010). Distributed collaborative control for industrial automation with wireless sensor and actuator networks. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Industrial Electronics*, 57(12), 4219–4230.
3. Kong, N., Ha, D.S. (2012). Low-power design of a self-powered piezoelectric energy harvesting system with maximum power point tracking. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transaction on Power Electronics*, 27(5), 2298-2308.
4. Uchino, K., Ishiic, T. (2010). Energy flow analysis in piezoelectric energy harvesting systems. *Ferroelectrics*, 400, 305-320.
5. Kong, N., Ha, D.S., Erturk, A., Inman, D.J. (2010). Resistive impedance matching circuit for piezoelectric energy harvesting. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 21, 1293-1302.
6. Kim, H., Priya, S., Stephanou, H., Uchino, K. (2007). Consideration of impedance matching techniques for efficient piezoelectric energy harvesting. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 54(9), 1851-1859.
7. Ottman, G.K., Hofmann, H.F., Bhatt, A.C., Lesieutre, G.A. (2002). Adaptive piezoelectric energy harvesting circuit for wireless remote power supply. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Power Electronics*, 17(5), 669-676.
8. Cottone, F., Vocca, H., Gammaitoni, L. (2009). Nonlinear Energy Harvesting. *Physical Review Letters*, 102(8), 080601–1-4.
9. Challa, V.R., Prasad, M.G., Fisher, F.T. (2009). A coupled piezoelectric– electromagnetic energy harvesting technique for achieving increased power output through damping matching. *Smart Materials and Structures*, 18, 095029–1-11.
10. Ferrari, M., Ferrari, V., Guizzettia, M., Andòb, B., Bagliob, S., Trigonab, C. (2010). Improved energy harvesting from wideband vibrations by nonlinear piezoelectric converters. *Sensors and Actuators A*, 162, 425–431.
11. Liang, J., Liao, W.H. (2011). Energy flow in piezoelectric energy harvesting systems. *Smart Materials and Structures*, 20, 015005–1-11.
12. Li, S., Yuan, J., Lipson, H. (2011). Ambient wind energy harvesting using cross-flow fluttering. *Journal of Applied Physics*, 109(2), 026104–1-3.
13. İnternet: Piezoelektrik, *wiki* içinde. URL: <https://tr.wikipedia.org/wiki/Piezoelektrik>, Son Erişim Tarihi: 02.01.2021.

14. Katzir, S. (2006). *The Beginning of Piezoelectricity*, 246. Springer, Dordrecht, Netherlands, 35-36.
15. Ciofani, G., Menciassi, A. (2011). *Piezoelectric Nanomaterials for Biomedical Applications*, 1st ed. Springer, Berlin, 97.
16. Moheimani, S.O.R., Fleming, A.J. (2006). *Piezoelectric Transducers for Vibration Control and Damping*, 1st ed, Springer, Newcastle, Australia, 10-11, 12.
17. Kaya, A , Koyuncu, M . (2016). Elektroeğirme Yöntemiyle Baryum Titanat (BaTiO₃) Nanofiber ve Nanotoz Üretimi ve Karakterizasyonu . *Selçuk Üniversitesi Fen Fakültesi Fen Dergisi*, 42(2), 136-143.
18. Uchino, K. (2000). *Ferroelectric Devices*, 1st ed. *Marcel Dekker, New York*, 152-157.
19. Ballas, R.G., Fujita, H., Liepmann, D. (2007). *Piezoelectric Multilayer Beam Bending Actuators*, 1st ed. Fujita, H., Liepmann, D., *Springer, New York*, 18-21, 24, 25.
20. Uzun, Y. (2012). *Periyodik manyetik alanlar etkisinde doğrusal olmayan titreşimlerden elektrik enerjisi üretimi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara
21. Malysh, T., Erhart, J. (2005). Electric field applicability limits for PZT ceramics. *Ferroelectrics*, 319, 45–56.
22. Simpson, J., Schweiger, J. (1998). Industrial approach to piezoelectric damping of large fighter aircraft components. *Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*, 3326, 34-46.
23. İnternet: Piezo enjektör nedir? Nasıl çalışır? Yapısı, Parçaları, Özellikleri. URL: <https://otomobilterknoloji.blogspot.com/2016/01/piezo-enjektorler-nasl-calsr.html>, Son Erişim Tarihi: 03.01.2021
24. İnternet: Piezoelectric Actuators & Motors. URL: https://piezo.com/collections/piezoelectric-actuators-motors?_pf&pf_t_quantity=Quantity__1, Son Erişim Tarihi: 12.10.2020
25. İnternet: LM317 3-Terminal Adjustable Regulator. URL: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm317.pdf?ts=1613661369226&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F, Son Erişim Tarihi: 06.09.2020
26. Clementino, M. A., Junior, C. M. (2013). *Modeling of a commercial piezoelectric energy harvesting device through experimental identification*. 22nd International Congress of Mechanical Engineering, Ribeirão Preto, Brazil.
27. İnternet: EH300/301 Series. URL: <https://www.digikey.com/en/product-highlight/a/advanced-linear-devices/eh300-eh301-series-energy-harvesting>
28. Kurt, E., Uzun, Y., Durmus, C., (2015). *Power characteristics of a new contactless piezoelectric harvester*. 4th International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems, Sharjah, United Arab Emirates.



EKLER

EK-1. Konferans Yayını : Power Characteristics of a New Contactless Piezoelectric Harvester

Abstract—This paper reports the preliminary results of a new designed harvester system called as the contactless piezoelectric wind energy harvester (CPWEH). It consists of three piezoelectric layers attached with the non-magnetic bars in different lengths in order to produce maximal power for a wide wind wide speed regime. Preliminary magnetic design has proven that three layers can be excited by the magnetic forces synchronously and this situation prevents to damage the piezoelectric layers since it does not make any physical contact to the layer. According to the results, this new harvester produces electrical power at low wind speeds such as 2.5 m/s. The harvested power can be obtained from the range of 2.5 mW to 17 mW. Therefore the efficiency of the harvester having a single piezoelectric layer has been introduced three times in the proposed design and implementation [28].

Keywords-*contactless, harvester, piezoelectric; magnetic flux*

I. INTRODUCTION

In last decade, there exists an increasing demand for the energy harvesting systems due to many applications of low power electronic devices such as sensors, actuators, small metallurgical devices, small cameras, etc [1,2]. These kind of low power devices get their electrical energy from batteries and/or harvesters. For instance wireless sensors are fed by batteries which use the chemical reactions and after some time, these reactions end when the potential difference ends. Thus, these batteries are needed to be changed periodically for the continuous usage of the device [3,4]. In addition, the batteries threaten the nature after their usage [4]. These kind of problems cause to improve new harvester systems in order to prevent the artifacts. According to the literature [1,5] there exist a number of harvester types: Capacitive, inductive, piezoelectric, thermoelectric, rf, etc. The most popular one is the piezoelectric harvesters, since the energy density of the piezoelectric harvester is higher [6]. In addition, this type of harvester gives a chance to make optimization for a certain excitation frequency range, thereby increases the energy harvesting efficiency. There exist many vibration sources in the nature. Among them, seismic, tidal, wind flow, thermal, electrical and magnetic effects can be counted [2,7]. It has been already known that the harvesters which get energy from the external vibration sources have the most efficient energy production nearby the natural frequency f_0 of the harvester vibrating units [8,9]. Therefore this is a side effect for these systems, if the external vibration has another frequency value

EK-1. (devamı) Konferans Yayını : Power Characteristics of a New Contactless Piezoelectric Harvester

different than f_0 . In fact, the efficiency of harvested power decays considerably. In the nature, nearly all the vibrations have a broad band frequency, which can have many frequency values. Thus, the construction of an efficient harvester for the broad band excitations is very vital task for the harvester technology [9-11] The reality motivates us to create new designs and constructions. For this aim, the design and preliminary power results from a new harvester are reported in this paper. The new harvester operates under the wind flow with its blades and the mechanical rotation is conveyed to the piezoelectric layers, which have different lengths and natural frequencies f_0 . Another interesting technique of this design and construction is that the system uses a contactless effect in order to vibrate the piezoelectric layers. Thus, the new system is much durable compared to the conventional harvester systems, since there is no mechanical direct contact over the layers. This effect is produced by the magnetic forces of permanent magnets in this new geometry. The paper is organized as follows: A theoretical formulation is given in the next section. In Section III, the experimental findings are reported. Finally, the concluding remarks are presented in the last section.

II. THEORETICAL VIEW

Fig. 1 shows the blade shaft and the orientation of the magnets and layers, when the harvester is under operation.

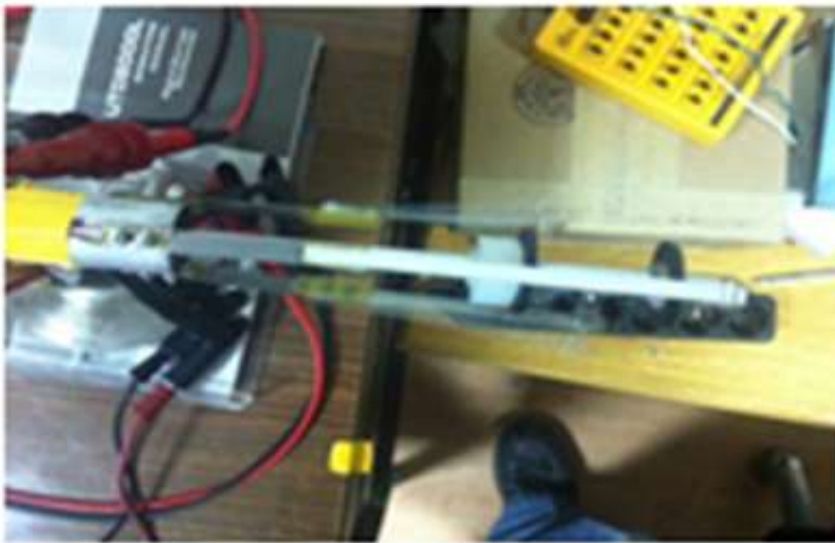


Fig. 1. The layers, magnets and blade shaft of the harvester under operation.

EK-1. (devamı) Konferans Yayını : Power Characteristics of a New Contactless Piezoelectric Harvester

The theoretical part includes two main studies: Analytical and magnetostatic simulations. Initially, the formulation of the proposed harvester can be made as follows:

$$\begin{aligned}
 \frac{d\theta}{dt} &= \omega \\
 L_1 \frac{d^2 r_1}{dt^2} &= \frac{1}{\rho A} (k u_1(t) + \alpha V_1(t) + F_m \delta(\theta - \theta_{10})) \\
 L_2 \frac{d^2 r_2}{dt^2} &= \frac{1}{\rho A} (k u_2(t) + \alpha V_2(t) + F_m \delta(\theta - \theta_{20})) \quad (1) \\
 L_3 \frac{d^2 r_3}{dt^2} &= \frac{1}{\rho A} (k u_3(t) + \alpha V_3(t) + F_m \delta(\theta - \theta_{30})) \\
 I_1(t) &= \alpha \frac{du_1(t)}{dt} - C \frac{dV_1(t)}{dt} \\
 I_2(t) &= \alpha \frac{du_2(t)}{dt} - C \frac{dV_2(t)}{dt} \\
 I_3(t) &= \alpha \frac{du_3(t)}{dt} - C \frac{dV_3(t)}{dt}
 \end{aligned}$$

Here, θ , ω , δ , L , ρ , A , r , u , α , V , F_m , θ_0 , C , I and k indicate angular position of magnet mounted on the shaft, propeller speed, Kronecker delta which gives 1 for $\theta = \theta_0$ else 0, length of the layer, mass density of layer, cross-section of layer, radial position to the center of shaft, mass displacement of layer, force factor of layer, voltage between the layer terminals, magnetic force, angular position of layer, layer capacitance, harvested current and stiffness constant of the layer, respectively. For a much detailed expression, we refer to our previous studies [12,13], which includes similar identical algebraic formulation. Since Eq. (1) includes time-dependent functions, it is not possible to find out exact solution to this equation set. Therefore time-integrated simulations can be performed to find out the function values. Another vital point is to determine the magnetic force F_m . For this, we refer to our earlier paper [12], which presents the force as a nonlinear function of the distance. Note that there exists no electrical current as in Ref. [12] in the present version, since the permanent magnets are only used in order to create the magnetic force. Since the piezoelectric layers and their corresponding magnets at the layer tips have been located at 120 degrees shift from each other at the outer radius. In addition, there magnets on the shaft have are located opposite to these magnets. Therefore all layers are repelled at the same time. Note also that the poles of magnets are oriented in such a way that the magnets on the shaft repel the magnets at the tip of the layers. at the same time. Fig. 2 shows a representative magnetic flux pattern around the radial direction. This pattern has been produced by Maxwell magnetostatic package. Note that only the magnetic flux of a single layer is shown. In fact, three layers produce three

EK-1. (devamı) Konferans Yayını : Power Characteristics of a New Contactless Piezoelectric Harvester

different repelling flux density for each 120 degrees shift around the shaft. The flux densities occur at different axial locations. It is clear that the flux density values become $B = 0.13 \text{ T}$ between two magnets.

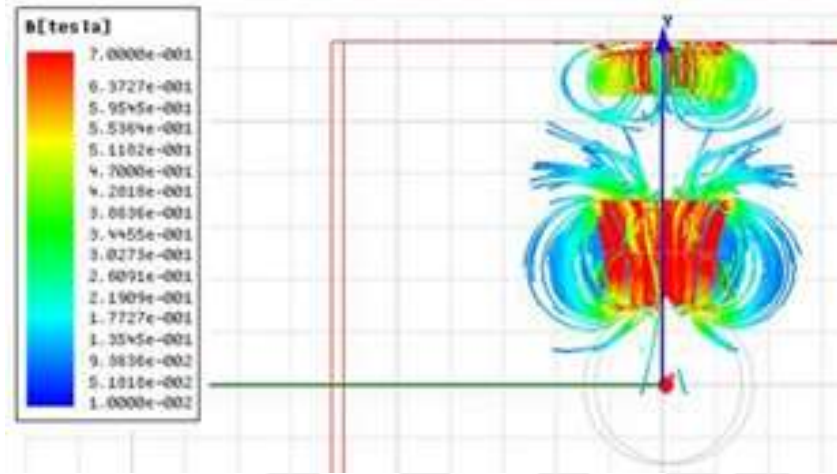


Fig. 2. The repelling field of the magnets mounted on the shaft and the layer tip.

This value is sufficient to repel the magnets and bend the layer, when the magnets come to the same angular position during the rotation motion.

III. EXPERIMENTAL

A. Shaker Measurements

In the shaker measurements, the frequency responses of three piezoelectric layers have been tested. Therefore the layers with different lengths have been attached to the shaker as in Fig. 3. For the tests an LDS V406 M4-CE shaker is used.

EK-1. (devamı) Konferans Yayını : Power Characteristics of a New Contactless Piezoelectric Harvester



Fig. 3. The frequency response test of the piezoelectric layer by a shaker.

During the tests, the frequency range between $f=1\text{Hz}$ and $f=22\text{ Hz}$ has been scanned for three layers. In order to record the instantaneous distance from the equilibrium point, a laser displacement sensor has been used. The laser displacement sensor has a head with type IL-065 and a control unit IL-1000 made by Keyence Inc. It can measure the displacement of the beam tip with a sufficient sensitivity of $4\mu\text{m}$. In addition, the sensor head can read the vibrations with the sampling rate of 1 ms . A rectifier, a three phase converter and a storage circuit also exist in the experimental system. In the experiments, an effective data acquisition system (NI USB-6250 DAQ) has been used. The card has 16 analog inputs; thereby it is possible to get multiple records of different parameters such as displacement and output voltages, synchronously.

EK-1. (devamı) Konferans Yayını : Power Characteristics of a New Contactless Piezoelectric Harvester

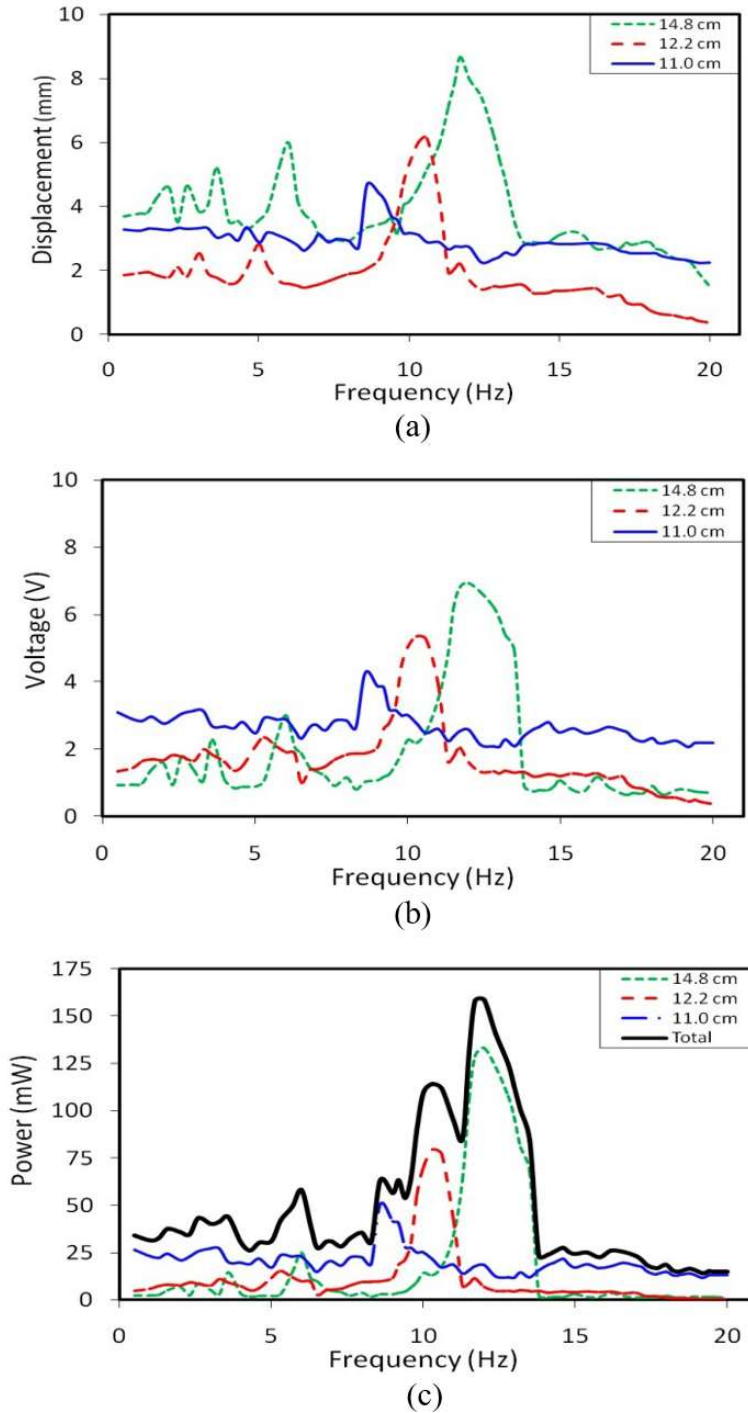


Fig. 4. (a) Displacement, (b) generated voltage from the piezoelectric terminals and (c) generated power as function of shaker frequencies (Load resistance is 350 K Ω).

Fig. 4 presents the shaker test results for each layer. Note that each layer gives different response to the frequency. According to Fig. 4(a), while the longest layer has the minimal

EK-1. (devamı) Konferans Yayını : Power Characteristics of a New Contactless Piezoelectric Harvester

distance, the shortest has the largest distance. The shortest layer can vibrate with 5.2 mm amplitude; however the shortest layer can vibrate with 1.8 mm as maximal values. The layer with moderate length vibrates with 4.2 mm. Note also that the frequency value which the maximal distance is observed changes for each layer in parallel with our consideration. Strictly speaking, the shortest layer vibrates with the maximal amplitude at 13 Hz, whereas the moderate and longest one vibrates with the maximal amplitude at 11 Hz and 8 Hz, respectively. These values change due to the natural frequencies of the layers as stated in the earlier section.

According to Fig. 4(b), the maximal amplitudes of voltage also changes parallel to the results in Fig. 4(a). Since the displacement is larger for the short layer, the maximal voltage has also been obtained for the shortest one. Similarly the maximal voltages decrease from 7.5 V to 4.2 V depending on the layer length. Note also that this characteristic gives maximal voltages at 13 Hz, 11 Hz and 8 Hz in parallel with Fig. 4(a). In order to compare the power outputs of the layers, Fig. 4(c) is depicted. Note that the same characteristics have also been observed for power. For the electrical load, $R_L = 350 \text{ K}\Omega$ is used for the maximal power gain. The power graph has three maxima with 135 mW, 80 mW and 50 mW. Therefore the total power, which is represented by dark black can have values upto 160 mW at 13 Hz. Besides, there layers can have larger than 60 mW between $f = 8 \text{ Hz} - 14.5 \text{ Hz}$. Thus the band width of the harvester can be increased to $\Delta f = 6.5 \text{ Hz}$ from 3.5 Hz. Thus the efficiency is doubled compared to the case of one layer. Compared to our previous study, which is made by single harvester [8], the proposed system can be activated for wider wind speeds.

B. Harvester Measurement

Following the determination of frequency characteristics by the shaker, the implementation of the harvester has been realized. Fig. 5 shows the experimental setup and the harvested waveforms in the oscilloscope screen.

EK-1. (devamı) Konferans Yayını : Power Characteristics of a New Contactless Piezoelectric Harvester



Fig. 5. The setup of the constructed wind energy harvester and wind tunnel.

Three layers have been mounted with 120 degrees shift on the outer part of the harvester (see also Fig. 1). Then the harvester is located at the gate of wind tunnel. The wind tunnel can produce the wind speed up to $u = 8$ m/s. However, we have found satisfactory to make the tests up to $u = 4.8$ m/s. In the setup, an anemometer, an oscilloscope, a resistive load, a harvester circuit and a three phase converter have been used. The voltage waveforms of three layers are shown in Fig. 6. These nonlinear waveforms are produced at the wind speed of 2.7 m/s. Due to the rotation, the layers can have successive repulsions. This situation can produce high frequency harmonics in the waveform. However the waveform can be filtered by the harvester circuit in order to obtain a dc waveform after converting the waveforms by a three phase converter.

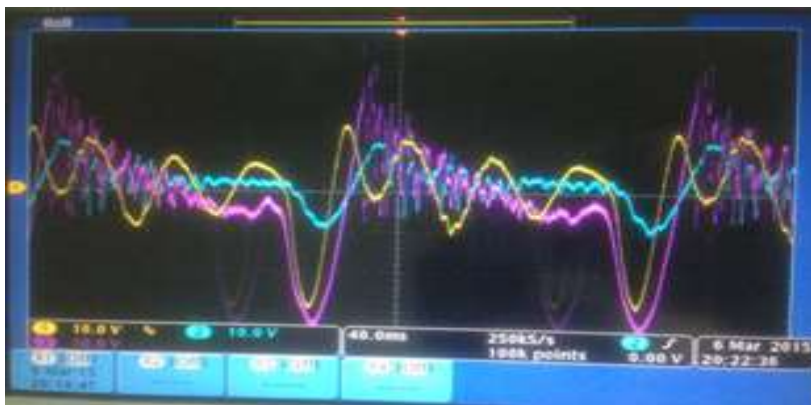
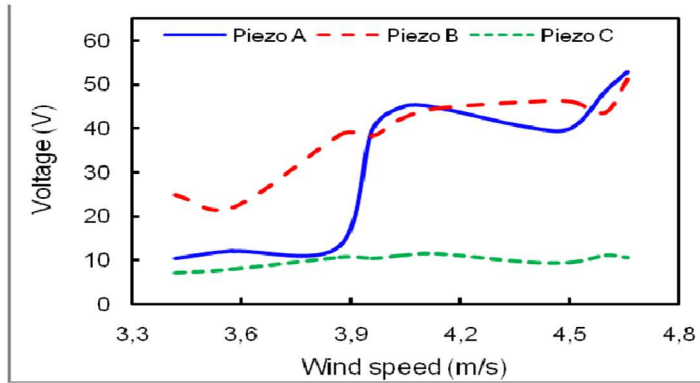


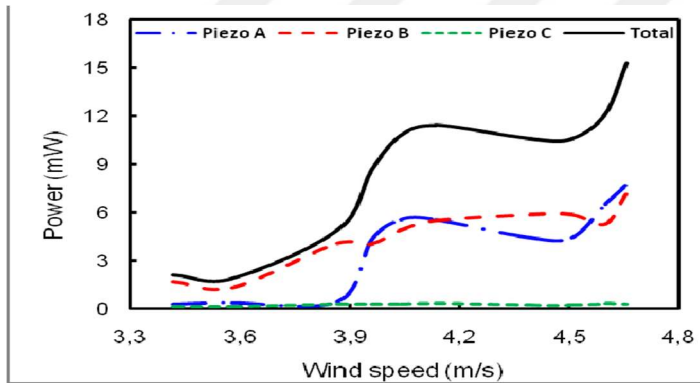
Fig. 6. The voltage wave forms from the terminals of three layers at $u=2.7$ m/s. Load resistance is $360\text{ K}\Omega$

EK-1. (devamı) Konferans Yayını : Power Characteristics of a New Contactless Piezoelectric Harvester

The wind tunnel tests have been realized between 3.1 m/s and 4.8 m/s. Fig. 7 gives the performance of the layers for increasing wind speeds.



(a)



(b)

Fig. 7. Wind tunnel test of new harvester

The maximal voltage is observed as 50 V around the speed 4.7 m/s as in Fig. 7(a). While the maximal amplitude changes rapidly for one of the piezoelectric layer (Piezo A), other layers do not change so rapidly. Since the shortest layer is much sensitive to the vibration due to its larger distance from the equilibrium, its voltage can increase rapidly by increasing speed. According to Fig. 7(b), the maximal power values of two layers are around 7 mW at 4.7 m/s. However, the longest layer cannot produce much power due to its small distance from the equilibrium. It can only produce 0.4 mW. The total power from

EK-1. (devamı) Konferans Yayını : Power Characteristics of a New Contactless Piezoelectric Harvester

the terminals of three layers is 17 mW for the same speed. Thus, the harvester power is doubled compared to the single layer device. In addition, the efficiency of the harvester has been increased for different wind speeds (i.e. frequency band). The suggested harvester can produce power for a wide wind speed from 3.3 m/s to 4.7 m/s.

IV. CONCLUSIONS

In this paper, preliminary results from a new contactless wind energy harvester have been presented. The new harvester can increase the power twice compared to the single piezoelectric layer. In addition, the frequency band (i.e. the wind speed), which is responsible for the energy production efficiency is increased upto $\Delta f = 6.5$ Hz. The harvested power has increased to 17 mW by the use of different piezoelectric layers. Thus the proposed harvester can generate electricity for a broader range of wind speed. Besides, the contactless feature of the harvester improves the life-time of the layers.

REFERENCES

- [1] E. Tufekcioglu, and A. Dogan, "A flextensional piezo-composite structure for energy harvesting applications," *Sensors and Actuators A*, vol. 216, pp. 355-363, 2014.
- [2] J.A.R. Azevedo, and F.E.S. Santos, "Energy harvesting from wind and water for autonomous wireless sensor nodes," *IET Circuits Devices Syst.*, vol. 6, pp. 413-420, 2012.
- [3] D. Paci, M. Schipani, V. Bottarel, and D. Miatton, "Optimization of a piezoelectric energy harvester for environmental broadband vibrations," *15th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems*, Malta, pp. 177-181, 2008.
- [4] C. Vankecke, L. Assou`ere, A. Wang, P. Durand-Est`ebe, F. Caignet, J.-M. Dilhac and M. Bafleur, "Multisource and battery-free energy harvesting architecture for aeronautics applications," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, pp. 3215-3227, 2015.
- [5] R. Calìò, U. B. Rongala, D. Camboni, M. Milazzo, C. Stefanini, G. Petris, and C. M. Oddo, "Piezoelectric energy harvesting solutions," *Sensors*, vol. 14, pp. 4755-4790, 2014.
- [6] S. Chamanian, S. Baghaee, H. Ulasan, Ö. Zorlu, H. Kùlah, and E. Uysal- Biyikoglu, "Powering-up wireless sensor nodes utilizing rechargeable batteries and an electromagnetic vibration energy harvesting system," *Energies*, vol. 7, pp. 6323-6339, 2014.
- [7] Y. Uzun, E. Kurt, and H. H. Kurt, "Explorations of displacement and velocity nonlinearities and their effects to power of a magnetically- excited piezoelectric pendulum," *Sensors and Actuators A*, vol. 224, pp. 119-130, 2015.
- [8] Y. Uzun, S. Demirbas, and E. Kurt, "Implementation of a new contactless piezoelectric wind energy harvester to a wireless weather station," *Elektronika ir Elektrotechnika*, vol. 20, pp. 35-39, 2014.
- [9] M. Ferrari, V. Ferrari, M. Guizzetti, B. Andò, S. Baglio, and C. Trigona, "Improved energy harvesting from wideband vibrations by nonlinear piezoelectric converters," *Sensors and Actuators A*, vol. 162, pp. 425- 431, 2010.
- [10] H. Zhang, and K. Afzalul, "Design and analysis of a connected broadband multi-piezoelectric-bimorph-beam energy harvester," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 61, pp. 1016-1023, 2014.

EK-1. (devamı) Konferans Yayını : Power Characteristics of a New Contactless Piezoelectric Harvester

- [11] A. Erturk, and D.J.Inman, “Broadband piezoelectric power generation on high-energy orbits of the bistable Duffing oscillator with electromechanical coupling,” *Journal of Sound and Vibration*, vol. 330, pp. 2339-2353, 2011.
- [12] Y. Uzun, and E. Kurt, “Implementation and modeling of a piezoelectric pendulum under a harmonic magnetic excitation”, 11th Int. Conf. Applications of Electrical Engineering, Greece, pp. 184–189, 2012.
- [13] Y. Uzun, and E. Kurt, “The effect of periodic magnetic force on a piezoelectric energy harvester”, *Sensors and Actuators A*, vol. 192, pp. 58–68, 2013.





GAZİ GELECEKTİR..