

**T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

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

Davut ÖZHAN

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ŞANLIURFA
2019**

**T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

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

Davut ÖZHAN

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ŞANLIURFA
2019**

Prof. Dr. Ramazan TAŞALTIN danışmanlığında, Davut ÖZHAN'ın hazırladığı “**Yeni bir piezoelektrik rüzgar enerjisi hasatçısı tasarımı ve uygulaması**” konulu bu çalışma 11/11/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

İmza

Danışman :Prof. Dr. Ramazan TAŞALTIN

2.Danışman :Prof. Dr. Erol KURT

Üye :Prof. Dr. Şevki DEMİRBAŞ

Üye :Doç.Dr. Bilal GÜMÜŞ

Üye :Doç.Dr. Mehmet ÇELEBİ

Üye :Dr. Öğrt. Üyesi Nurettin BEŞLİ

Üye :Dr. Öğrt. Üyesi Kerim KARADAĞ

Bu Tezin Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Yapıldığını ve Enstitümüz Kurallarına Göre Düzenlendiğini Onaylarım.

Doç. Dr. İsmail HİLALİ
Enstitü Müdürü

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

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ	iv
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
1. GİRİŞ	1
1.1. Titreşimden Enerji Hasatı Yöntemleri.....	3
1.1.1. Elektromanyetik enerji hasatı	4
1.1.2. Elektrostatik enerji hasatı	5
1.1.3. Piezoelektrik enerji hasatı.....	6
1.2. Enerji Hasat Yöntemlerin Karşılaştırılması.....	7
1.3. Piezoelektrik Malzemeler	10
1.4. Piezoelektrik Etkinin Oluşumu	11
1.5. Piezoelektrik Enerji Hasatı Genel Eşitlikleri.....	13
1.6. Piezoelektrik Malzemelerin Özelliklerini Etkileyen Sabitler	14
1.6.1. Piezoelektrik yük sabiti (d).....	15
1.6.2. Piezoelektrik gerilim sabiti (g)	17
1.6.3. Etkileşim sabiti (k)	18
1.6.4. Elastik uygunluk sabiti (S)	18
1.6.5. Dielektrik sabiti (ε).....	19
1.6.6. Mekanik kalite sabiti (Qm).....	20
1.7. Piezoelektrik Malzemelerin Sınıflandırılması	20
1.7.1. Piezoelektrik kristaller-seramikler.....	21
1.7.2. Piezoelektrik polimerler	22
1.7.3. Piezoelektrik kompozitler.....	22
1.8. Piezoelektrik Malzemelerin Uygulama Alanları	23
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	25
3. MATERYAL ve YÖNTEM	29
3.1. Materyal	29
3.1.1. Tasarlanan piezoelektrik rüzgar enerji hasat (PWEH) sistemi	30
3.1.2. Piezoelektrik rüzgar enerji hasat (PWEH) sisteminin teorik ifadesi.....	37
3.1.3. Piezoelektrik rüzgar enerji hasat (PWEH) sisteminden enerji elde edilmesi	41
3.2. Yöntem.....	62
3.2.1. Piezoelektrik rüzgar enerji hasat sistemi ve MPPT devre benzetimi.....	63
3.2.2. Piezoelektrik rüzgar enerji hasat sistemi tasarımı ve MPPT uygulaması.....	72
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	76
4.1. Piezoelektrik Rüzgar Enerji Hasat (PWEH) Sistemin Gerçek Rüzgar Hızlarında Denenmesi	76
4.2. Piezoelektrik Rüzgar Enerji Hasat (PWEH) Sistemine Maksimum Güç Noktası İzleme (MPPT) Yönteminin Uygulanması	82
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	87
5.1. Sonuçlar.....	87
5.2. Öneriler	88
KAYNAKLAR	90
ÖZGEÇMİŞ	95

ÖZET

Doktora Tezi

YENİ BİR PİEZOELEKTRİK RÜZGÂR ENERJİSİ HASATÇISI TASARIMI VE UYGULAMASI

Davut ÖZHAN

Harran Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ramazan TAŞALTIN
2. Danışman: Prof. Dr. Erol KURT
Yıl: 2019, Sayfa:95

Bu tez, yeni bir üçlü piezoelektrik enerji hasat (PEH) cihazının tasarım ve imalatını konu almaktadır. Cihazın tasarımı ve imalatına ek olarak maksimum güç noktasını izleme (MPPT) devresi de bu cihaza eklenmiştir. İmal edilmiş bulunan cihaz, pervanesini döndüren rüzgar enerjisini elektrik enerjisine doğrudan çevirmekte olup piezoelektrik levhalardan üretilen dalgaformunu, yüksek toplam harmonik bozulmayı (THD) en aza indirerek bataryada depolayabilmekte veya anlık olarak kullanabilmektedir. Piezoelektrik levhalar, farklı kütlelere (böylece farklı doğal frekanslara) sahip olup cihazın bu özelliği sayesinde geniş uyartım bandında etkili enerji üretmesi planlanmıştır. Tasarlanan cihazda; uçlarına sabit mıknatıslar yerleştirilen piezoelektrik katmanlar, dönme eksenine göre 120°lik açılar oluşturacak şekilde yerleştirilmiş olup bu geometri çok düşük rüzgar hızlarında bile dönebilen döner eksene bağlı diğer sabit bir mıknatısla bir itme oluşturur. Bu etki, üç piezoelektrik tabakayı 120°lik faz kayması ile enerji hasadı yapmasına imkan vermektedir. Döner eksene bağlı sabit mıknatıs ve katmanların uçlarına yerleştirilen diğer sabit mıknatıslar birbirlerine fiziksel olarak temas etmediğinden, bu durum tasarlanan cihazın uzun ömürlü çalışmasına olanak vermektedir. MPPT devresi yardımıyla sistemden maksimum güç elde edilen cihaz, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Alternatif Enerji Araştırmaları Laboratuvarında (ALENAR) farklı rüzgar hızlarında başarıyla test edilmiştir. Cihazın 1.7 m/s gibi düşük rüzgar hızlarında bile çalışabildiği ispatlanmış olup cihaz, enerji çevrim süreçlerine iyi bir adaydır.

ANAHTAR KELİMELER: Piezoelektrik, enerji hasatı, MPPT, güç, verim

ABSTRACT

PhD Thesis

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A NEW PIEZOELECTRIC WIND ENERGY HARVESTER

Davut ÖZHAN

**Harran University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical and Electronics Engineering**

1'st. Supervisor: Prof. Dr. Ramazan TAŞALTIN

2'nd. Supervisor: Prof. Dr. Erol KURT

Year: 2019, Page:95

This dissertation subjects the design and implementation of a new triple piezoelectric energy harvester (PEH). In addition to the design and implementation of the device, a maximum power point tracking (MPPT) circuit has also been added to the device. The implemented device can convert the wind energy to the electrical energy by the help of a rotating propeller; thereby the total harmonic distortion (THD) of the generated waveform can be stored into a battery or used instantaneously after the maximal decrease of THD. The piezoelectric layers have different masses (i.e. different natural frequencies) and this feature is planned to generate energy in a wide frequency band, efficiently. In the designed device, the piezoelectric layers having permanent magnets (PMs) at their ends with 120° degrees according to the rotating axis and another magnet stucked on the central rotating axis can cause a repulsion. This effect enables the device to harvest energy with a 120° phase shift at even very low wind speeds. Since the magnet located at the central rotating axis and the ones located at the end of layers do not physically contact, this situation enables the device to operate for long life span. The device, which generates maximum power due to the MPPT circuit has been tested successfully under different wind speeds at the Alternative Energy Researches Laboratory (ALENAR) of Technology Faculty, Gazi University. It has been even proven that the device can operate under very low wind speeds such as 1.7 m/s and that makes it a good candidate for the energy conversion processes.

KEYWORDS: Piezoelectric, energy harvester, MPPT, power, efficiency

TEŐEKKÜR

Bu tez çalıŐması sűresince bana her tűrlű desteęi veren sevgili danıŐman hocam Prof.Dr. Ramazan TAŐALTIN'a ve ikinci danıŐman hocam sevgili Prof. Dr. Erol KURT'a çok teŐekkűr ederim. ÇalıŐma boyunca sűrekli yardımını esirgemeyen sevgili arkadaŐım ArŐ. Gűr. Ŭnal YILMAZ'a sevgilerimi sunarım. Yine beni bu gűnlere getiren aileme, beni sűrekli olarak destekleyen sevgili eŐım Fidan'a ve biricik oęlum Fahrettin Ali'me çok teŐekkűr ederim.



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1. Mobil cihazların enerji ihtiyacının enerji hasat sistemlerinden karşılanması durumu	2
Şekil 1.2. Elektromanyetik enerji hasat yöntemi	4
Şekil 1.3. Elektrostatik enerji hasat yöntemleri; a) düzlem içi örtüşmeli, b) düzlem içi boşluk kaplamalı, c) düzlem dışı boşluk kaplamalı	5
Şekil 1.4. Piezoelektrik enerji hasat yöntemi	7
Şekil 1.5. Perovskit yapıya sahip kurşun zirkonat titanat'ın (PZT) kristal yapısı a) kristalin kübik yapısı b) kristalin dikdörtgensel yapısı	10
Şekil 1.6. Piezoelektrik malzemelerde doğrudan ve ters piezoelektrik etkinin gösterimi a) kutuplanmış piezoelektrik malzeme, b) kutuplanma yönünde sıkıştırılan malzemenin elektron hareketi ve üretilen enerji, c) kutuplanma yönünde gerilen malzemenin elektron hareketi ve üretilen enerji, d) kutuplanma gerilimi ile aynı yönde uygulanan gerilim sonucu malzemenin şekli, e) kutuplanma gerilimi ile zıt yönde uygulanan gerilim sonucu malzemenin şekli	12
Şekil 1.7. Piezoelektrik malzemelerde '33' ve '31' modların gösterimi	14
Şekil 1.8. Piezoelektrik malzemelerin sabitleri için kullanılan indis ve eksenler	15
Şekil 3.1. (a) Önerilen rüzgâr enerji üretici ve test düzeneği, (b) piezoelektrik tabakalar ve mıknatıslar, (c), (d) enerji üreteceği sistemindönen parçaların kapalı görünüşleri	29
Şekil 3.2. Piezoelektrik rüzgar enerji hasat sistemden maksimum güç elde etmek için tasarlanan ve uygulanan gerçek devre düzeneği	30
Şekil 3.3. Piezoelektrik rüzgar enerji hasat (PWEH) sistemi	33
Şekil 3.4.(a) Piezoelektrik levha (b) piezoelektrik levhalara yapıştırılan mıknatıslar (c) Bu piezoelektrik levhalar ve mıknatısların görünümü	34
Şekil 3.5. Sistemde gömülü olan sabit mıknatıs görünümü	34
Şekil 3.6. Piezoelektrik levhalar ve mıknatısların döner şaft etrafında yerleştirilmesi	35
Şekil 3.7. Döner parçaların kapalı görünümü	36
Şekil 3.8. Deneylerde ve simülasyonlarda kullanılan piezoelektrik malzemeler ve özellikleri	36
Şekil 3.9. Tasarlanan devrenin doğrultucu ve depolama ünitesi	42
Şekil 3.10. Üç adet piezoelektrik enerji toplayıcı ile 100 µF kapasitör şarjının grafiği PZT-303 piezo malzeme kullanılmıştır	43
Şekil 3.11. 100 µF kapasitörün üç adet piezoelektrik enerji toplayıcı ile şarj edilmesinin simülasyonunun detayı: a işaretindeki konumda gerilim 22.4 V'a eşittir PZT-303 piezo malzeme kullanılmıştır	44
Şekil 3.12. Piezoelektrik terminallerinden elde edilen gerilim sinyallerin görüntüleri genel devresi ..	45
Şekil 3.13. Piezoelektrik terminallerin uçlarına konulan farklı sayıda kalıcı mıknatısın 120 derecelik açıyla konumlanması	46
Şekil 3.14. Piezoelektrik tabakalardan elde edilen gerilim sinyallerini bilgisayar ekranında görülmesini sağlayan kart	46
Şekil 3.15. Piezoelektrik levhalardan elde edilen gerilim sinyallerinin ekran görüntüleri	47
Şekil 3.16. Doğrultucu çıkışındaki gerilim sinyali görüntüsü	48
Şekil 3.17. Rüzgar hızı=3.2 m/s ve RL= 800 kΩ değerleri için piezoelektrik katmanlarındalgı formları osiloskop görüntüsü PZT-203 piezo malzeme kullanılmıştır	48
Şekil 3.18. Rüzgâr hızı v = 2.88 m/s ve RL= 800 kΩ değerleri için piezoelektrik katmanların dalga formları osiloskop görüntüsü PZT-203 piezo malzeme kullanılmıştır	49
Şekil 3.19. Rüzgar hızı v=0.9 m/sn, ve m=2x0,42=0.84gr. piezoelektrik levhaların uçlarına iki kalıcı mıknatısın yerleştirilmesi ile elde edilen gerilim sinyalleri PZT-203 piezo malzeme kullanılmıştır	50
Şekil 3.20. Rüzgar hızı v=2.9 m/sn, ve m=2x0,42=0.84gr. piezoelektrik levhaların uçlarına iki kalıcı mıknatısın yerleştirilmesi ile elde edilen gerilim sinyalleri PZT-203 piezo malzeme kullanılmıştır	50
Şekil 3.21. Rüzgar hızı v=5.6 m/sn, ve m=2x0,42=0.84gr. piezoelektrik levhaların uçlarına iki kalıcı mıknatısın yerleştirilmesi ile elde edilen gerilim sinyalleri PZT-203 piezo malzeme kullanılmıştır	51
Şekil 3.22. Rüzgar hızı 2.9 m/sn, m=2x0,42=0.84gr. iki kalıcı mıknatısın olduğu ve 100 kΩ değerinde bir çıkış yükü bağlandığında oluşan gerilim sinyalleri PZT-203 piezo malzeme kullanılmıştır	52

Şekil 3.23. Rüzgar hızı 4.7 m/sn, $m=2 \times 0.42=0.84$ gr. iki kalıcı mıknatısın olduğu ve 100k Ω değerinde bir çıkış yükü bağlandığında oluşan gerilim sinyalleri PZT-203 piezo malzeme kullanılmıştır	52
Şekil 3.24. Rüzgar hızı $v=1.71$ m/sn, ve $m=3 \times 0.42=1.26$ gr. piezoelektrik levhaların uçlarına üç kalıcı mıknatısın yerleştirilmesi ile elde edilen gerilim sinyalleri PZT-203 piezo malzeme kullanılmıştır	53
Şekil 3.25. Rüzgar hızı $v=4.7$ m/sn, ve $m=3 \times 0.42=1.26$ gr. piezoelektrik levhaların uçlarına üç kalıcı mıknatısın yerleştirilmesi ile elde edilen gerilim sinyalleri PZT-203 piezo malzeme kullanılmıştır	54
Şekil 3.26. Rüzgar hızı 4.7 m/sn, $m=3 \times 0.42=1.26$ gr. üç kalıcı mıknatısın olduğu ve 100k Ω değerinde bir çıkış yükü bağlandığında oluşan gerilim sinyalleri PZT-203 piezo malzeme kullanılmıştır	54
Şekil 3.27. Rüzgar hızı $v=1.71$ m/sn,ve $m=3 \times 0.42=1.26$ gr. piezoelektrik levhaların uçlarına üç kalıcı mıknatısın yerleştirilmesi ile elde edilen gerilim sinyalleri PZT-203 piezo malzeme kullanılmıştır	55
Şekil 3.28. Rüzgar hızı $v=2.9$ m/sn, ve $m=3 \times 0.42=1.26$ gr. piezoelektrik levhaların uçlarına üç kalıcı mıknatısın yerleştirilmesi ile elde edilen gerilim sinyalleri PZT-203 piezo malzeme kullanılmıştır	56
Şekil 3.29. Rüzgar hızı $v=4.7$ m/sn, ve $m=3 \times 0.42=1.26$ gr. piezoelektrik levhaların uçlarına üç kalıcı mıknatısın yerleştirilmesi ile elde edilen gerilim sinyalleri PZT-203 piezo malzeme kullanılmıştır	56
Şekil 3.30. Rüzgar hızı 4.7 m/sn, $m=3 \times 0.42=1.26$ gr üç kalıcı mıknatısın olduğu ve 100k Ω değerinde bir çıkış yükü bağlandığında oluşan gerilim sinyalleri PZT-203 piezo malzeme kullanılmıştır	57
Şekil 3.31. Piezoelektrik sinyallerin FFT analizleri a) V_{PZ1} 1. piezoelektrik levha, b) V_{PZ2} 2. piezoelektrik levha, c) V_{PZ3} 3. piezoelektrik levha PZT-203 piezo malzeme kullanılmıştır	58
Şekil 3.32. Gerçek rüzgar hızlarında sistemin test edilmesi. a) $R_L=1M\Omega$, b) $R_L=100k\Omega$ PZT-203 piezo malzeme kullanılmıştır	60
Şekil 3.33. $R_L=1M\Omega$ değerinde farklı rüzgar hızları için voltaj ve güç değişimi PZT-203 piezo malzeme kullanılmıştır	61
Şekil 3.34. Piezoelektrik rüzgar enerji hasat sistemi genel şeması PZT-203 piezo malzeme kullanılmıştır	63
Şekil 3.35. Piezoelektrik rüzgar enerjisi hasat makinesi için mppt kontrol devresinin ayrıntılı simülasyonunun şematik gösterimi PZT-203 piezo malzeme kullanılmıştır	64
Şekil 3.36. V_{PZ1} , V_{PZ2} ve V_{PZ3} piezoelektrik levhaları dalga formları osiloskop görüntüleri PZT-203 piezo malzeme kullanılmıştır	66
Şekil 3.37. Doğrultulmuş gerilim sinyali (V_{rect}) dalga formu osiloskop görüntüsü	67
Şekil 3.38. Ölçülen V_{OC} gerilim dalga formu	68
Şekil 3.39. MPPT algoritmasının akış şeması.	69
Şekil 3.40. a) MPPT kontrol devresi (duty cycle) çalışma döngüsü b) $D + dt$, $D-dt$ varyasyonları	70
Şekil 3.41. MPPT kontrol devresinin çalışması sırasında V_{sc} çıkış gerilimi	71
Şekil 3.42. Tasarlanan PWEH sistemin verim hesaplamasında kullanılan devre	72
Şekil 3.43. Tasarlanan piezoelektrik rüzgar enerji hasat sistemin genel görünümü	73
Şekil 3.44. Tasarlanan piezoelektrik rüzgar enerji hasat sistemi gerçek devresi (5cmx8cm)	74
Şekil 4.1. Rüzgar hızı $v=1.21$ m/sn, ve $m=2 \times 0.42=0.84$ gr. 2 kalıcı mıknatısın yerleştirilmesi ile elde edilen gerilim sinyalleri PZT-203 piezo malzeme kullanılmıştır.	77
Şekil 4.2. Rüzgar hızı $v=2.91$ m/sn, ve $m=2 \times 0.42=0.84$ gr. 2 kalıcı mıknatısın yerleştirilmesi ile elde edilen gerilim sinyalleri PZT-203 piezo malzeme kullanılmıştır	77
Şekil 4.3. Rüzgar hızı $v=3.81$ m/sn, ve $m=2 \times 0.42=0.84$ gr.2 kalıcı mıknatısın yerleştirilmesi ile elde edilen gerilim sinyalleri PZT-203 piezo malzeme kullanılmıştır	78
Şekil 4.4. Rüzgar hızı $v=1.21$ m/sn, ve $m=3 \times 0.42=1.26$ gr. 3 kalıcı mıknatısın yerleştirilmesi ile elde edilen gerilim sinyalleri PZT-203 piezo malzeme kullanılmıştır	78
Şekil 4.5. Rüzgar hızı $v=2.23$ m/sn, ve $m=3 \times 0.42=1.26$ gr. 3 kalıcı mıknatısın yerleştirilmesi ile elde edilen gerilim sinyalleri PZT-203 piezo malzeme kullanılmıştır	79
Şekil 4.6. Rüzgar hızı $v=2.91$ m/sn, ve $m=3 \times 0.42=1.26$ gr. 3 kalıcı mıknatısın yerleştirilmesi ile elde edilen gerilim sinyalleri PZT-203 piezo malzeme kullanılmıştır	79
Şekil 4.7. Rüzgar hızı $v=3.81$ m/sn, ve $m=3 \times 0.42=1.26$ gr. 3 kalıcı mıknatısın yerleştirilmesi ile elde edilen gerilim sinyalleri PZT-203 piezo malzeme kullanılmıştır	80

Şekil 4.8. Rüzgar hızı $v=1.21$ m/sn, ve $m=4 \times 0.42=1.68$ gr. 4 kalıcı mıknatısın yerleştirilmesi ile elde edilen gerilim sinyalleri PZT-203 piezo malzeme kullanılmıştır	80
Şekil 4.9. Rüzgar hızı $v=2.23$ m/sn, ve $m=4 \times 0.42=1.68$ gr. 4 kalıcı mıknatısın yerleştirilmesi ile elde edilen gerilim sinyalleri PZT-203 piezo malzeme kullanılmıştır	81
Şekil 4.10. Rüzgar hızı $v=2.91$ m/sn, ve $m=4 \times 0.42=1.68$ gr. 4 kalıcı mıknatısın yerleştirilmesi ile elde edilen gerilim sinyalleri PZT-203 piezo malzeme kullanılmıştır	81
Şekil 4.11. Rüzgar hızı $v=3.81$ m/sn, ve $m=4 \times 0.42=1.68$ gr. 4 kalıcı mıknatısın yerleştirilmesi ile elde edilen gerilim sinyalleri PZT-203 piezo malzeme kullanılmıştır	82
Şekil 4.12. Gerçek rüzgar hızlarında açık devre gerilimi V_{oc} ve V_{sc} a) $RL=100$ k Ω , b) $RL=1.2$ k Ω ...	83
Şekil 4.13. Değişik rüzgar hızlarında görev döngüsü (duty cycle) gösterimi	84
Şekil 4.14. Çeşitli çıkış yüklerinde hasat sisteminin güç ve verim grafiği	85
Şekil 4.15. Farklı yük dirençleri için MPP tabanlı gerilim ve güç üretimi	86



ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

Çizelge 1.1. Enerji hasat yöntemlerinin karşılaştırılması	8
Çizelge 1.2. Enerji hasat yöntemleri için en yüksek enerji yoğunluğu değerleri	8
Çizelge 1.3. Enerji hasatı kaynakları ve yöntemleri güç kaynağı cinsinden karşılaştırılması	9
Çizelge 1.4. Yumuşak ve sert piezoelektrik seramiklerin bazı özellik ve karakteristiklerin karşılaştırılması	22
Çizelge 3.1. Deney ve benzetim kullanılan piezoelektrik malzemeler	37
Çizelge 3.2. MPPT güç devresinin optimize edilmiş parametreleri	65



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

A	Amper
Ah	Amper-saat
μ	Mikro
ρ	Hava yoğunluğunu
ε	Elektromotor kuvveti
Φ_B	Manyetik akı
V_{oc}	Açık devre gerilimi
$V_{oc}/2$	Açık devre geriliminin yarısı
I_{cc}	Kapalı devre akımı
N	Bobinin sarım sayısı
B	Manyetik alan yoğunluğu
lb	Bobinin bir sarımının uzunluğu
x	Bobinin manyetik alandaki hareket miktarı
dl	Levhalar arasındaki mesafe
l	Levhanın boyu
w	Levhanın genişliği
ε_T	Piezoelektrik malzemenin dielektrik katsayısı
C	Kapasitans
L	Bobin indüktansı
f	Frekans
F	Farad
$^{\circ}C$	Santigrad derece
dB	Desibel
d	Piezoelektrik yük sabiti
D	Birim elektriksel yük
E	Elektriksel alan
F	Kuvvet
g	Piezoelektrik gerilim sabiti
Hz	Hertz
J	Joule
k	Malzeme sertliği
m	Kütle
v	Rüzgar hızı
V	Volt
k	Kilo
K	Dielektrik sabiti
Ω	Ohm
M	Mega
ε	Elektriksel geçirgenlik
ε_0	Boşluğun elektriksel geçirgenliği
μ	Mikro
m/s	Metre/saniye
n	Nano
O ₂	Oksijen
P	Güç
R	Direnç
RL	Yük Direnci
S	Elektriksel uygunluk sabiti
S	Mekaniksel gerinme
C^E	Elastik bileşenler matrisi
ε^S	Dielektrik sabiti matrisi
s	Saniye
Q	Elektrik yükü
Q _m	Mekaniksel kalite sabiti
T	Mekaniksel gerilme

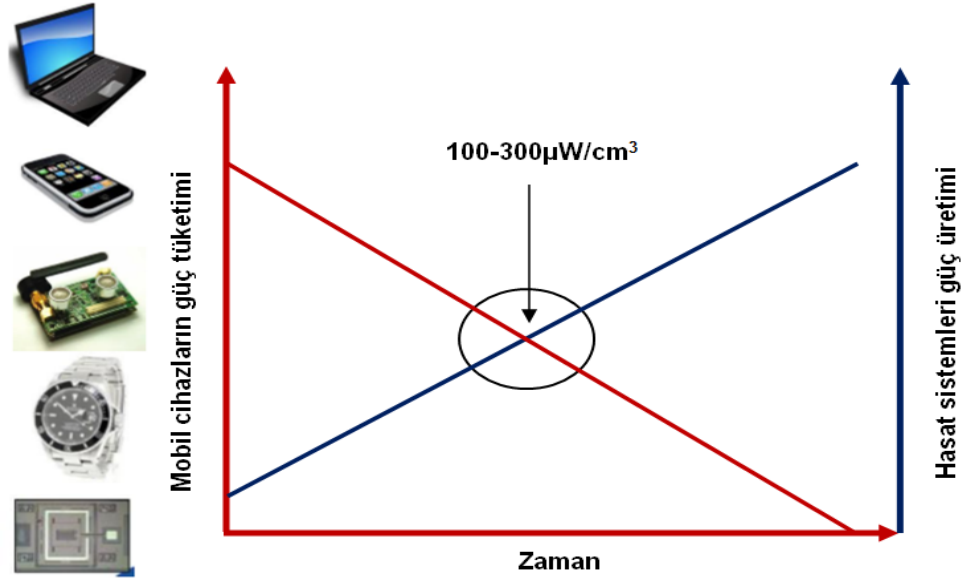
U	Morse Potansiyeli
Wh	Watt-saat
t	Piezoelektrik malzemenin kalınlığı
Y	Young modül
Zr	Zirkonyum
Pb	Kurşun
Ti	Titanyum
AA	Alternatif Akım
DA	Doğru Akım
EM	Elektromanyetik
ES	Elektrostatik
FFT	Hızlı Fourier Dönüşümü
MEMS	Mikro Elektromekaniksel Sistemler
NEMS	Nano Elektromekaniksel Sistemlerler
MFC	Makro Fiber Kompozit
BaTiO ₃	Baryum Titanat
CaTiO ₃	Kalsiyum Titanat
KNbO ₃	Potasyum Niobate
PbTiO ₃	Kurşun Titanat
PbZrO ₃	Kurşun Zirkonat
PbZrTiO ₃	Kurşun Zirkonat Titanat
EH	Enerji Hasat Sistemi
PEH	Piezoelektrik Enerji Hasatı
PWEH	Piezoelektrik Rüzgar Enerji Hasatı
MPP	Maksimum Güç Noktası
MPPT	Maksimum Güç Noktası İzleyici
PVDF	Poliviniliden Florid
PZ	Piezoelektrik
PZT	Kurşun Zirkonat Titanat
PWM	Darbe Genişlik Modülasyonu
SiO ₂	Kuvars
THD	Toplam Harmonik Bozulma
WSN	Kablosuz Sensör Ağı
Zn	Çinko Oksit

1. GİRİŞ

Gelişen teknoloji ile birlikte günümüzde ülkelerin çoğu şu anda enerji ihtiyaçlarının büyük bir kısmını fosil yakıtlar ve nükleer enerji santrallerinden temin etmektedirler. Ancak bu yakıtların dünya çapında giderek azalması ve doğal çevreyi çok ciddi olumsuz bir şekilde kirletmeleri nedeniyle alternatif enerji uygulamalarına yönelik çalışmalar akademik ve endüstriyel çevrelerce üzerinde yoğunlaşan önemli konulardan biri haline gelmiştir. Yenilenebilir enerjinin gelişimi, enerji çeşitliliği ve mevcut durumdaki enerji eksikliğini tamamlamak için önem kazanmaktadır(Kong ve Ha, 2012).

Mobil cihazlar ve kablosuz sensör ağların(WSN)tükettiği güç miktarları son zamanlarda gelişen teknoloji ile beraber ciddi anlamda azalmıştır. Bu uygulamalar için genellikle birincil enerji kaynakları olarak piller kullanılmaktadır. Bu tür cihazlara ve devrelere takılan pillerin kısa ömürlü olması, cihazın etkin kullanım süresince defalarca değiştirilmesi ve bazı mühendislik uygulamaların içerisinde gömülü olmaları bu tür cihazlarda pil kullanmak ve değiştirmek bazen imkansız olmaktadır(Kong ve Ha, 2012).

Mikro hatta nano boyutlarda üretilen enerji hasat sistemleri (EH) güç tüketimleri önemli ölçüde azalan bu tür elektronik cihaz ve devre uygulamaların ihtiyacı olan düşük güç değerlerini karşılayabilecek seviyelere gelmiştir. Öyle ki, son zamanlarda yapılan çalışmalara baktığımızda bu uygulamaların birincil enerji kaynağı olan pillerin yerini alacağını bile söylemek mümkündür. Şekil 1.1.'de mobil cihazların güç tüketimi ile enerji hasat sistemlerin ürettiği güç miktarı karşılaştırıldığında bu durum daha iyi anlaşılacaktır (Pongaliur ve ark., 2009).



Şekil 1.1. Mobil cihazların enerji ihtiyacının enerji hasat sistemlerinden karşılanması durumu

Alternatif enerji kaynakları; güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, akarsu ve nehirlerin oluşturduğu akıntılar, deniz ve okyanus dalgaların kinetik enerjisi, jeotermal enerji ve biokütle enerjisi olarak sıralanabilir. Bu sayılan alternatif enerji kaynakları ile beraber mekanik sistemlerin meydana getirdiği titreşim enerjisinin farklı dönüştürücü yöntemleri kullanılarak elektrik enerjisine çevrilmesi de yenilenebilir alternatif enerji kaynağı olarak sıralanmaktadır. Titreşim enerjisi; suyun akışı, rüzgar, şok ve deniz dalgaları, insan vücut hareketleri, yüksek değerlerde güç taşıyan kablolarının etrafında oluşan manyetik gürültü gibi çeşitli mekanik ve elektromanyetik formlarda bulunabilirler.

Alternatif enerji denildiğinde genellikle güneş enerjisi veya güneş hücresi, fotovoltaik güneş hücresi paneli, pratikte % 5-20 oranında verimi olan ve ilk yenilenebilir enerji kaynağı olarak aklımıza gelmekle beraber (Hande ve ark., 2007), son zamanlarda gelişen teknoloji ile beraber piezoelektrik dönüştürücüler kullanarak titreşim enerjisinden maksimum seviyede güç elde ederek elektrik enerjisi elde etme ile ilgili akademik ve endüstri uygulamalar giderek önem kazanmıştır. Mekanik titreşim enerjisinin piezoelektrik malzemeler yardımı ile elektrik enerjisine dönüştürülmesi ve enerjinin depolandığı piezoelektrik hasat (PEH) sistemleri 2000 yılların başından bu yana önemli çalışma konusudur.

Daha önceleri bu enerji ısı ve pasif sönümlenme şeklinde kullanılmadan harcanırken şimdilerde ise enerji hasat sistemleri yardımı ile birçok düşük güç tüketimi olan sistemlerin çalıştırılmasında kullanılmaktadır (Tabesh ve Fréchet, 2010). Bu tez çalışmasında; yeni tasarlanmış ve uygulamaları deneysel ölçümlerle yapılan piezoelektrik rüzgar enerji hasat (PWEH) sisteminin tasarım özellikleri incelenmiştir (Kurt ve ark., 2017). Sistemin dalga şekillerinin çok sayıda düşük harmonik ve süper harmonik bileşen içermesi, akım ve gerilim karakteristiklerinin doğrusal olmaması bu piezoelektrik enerji hasat sisteminin veriminin düşük olmasına sebep olmaktadır (Kurt ve Uzun, 2017).

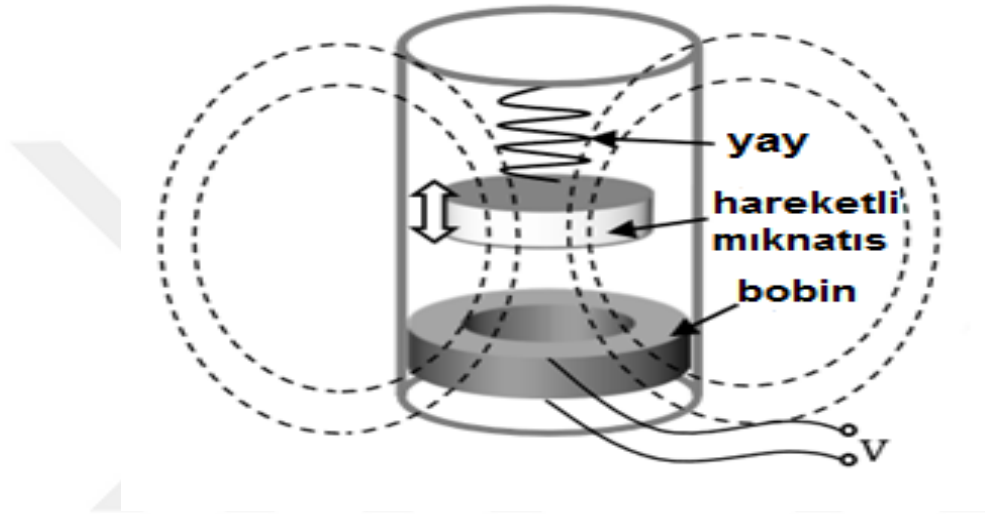
Öyle ki, sistemden elde edilen enerjinin %20'si ancak düzeltilebilmekte ve toplanan enerji kullanımı için depolanabilmektedir. Bu düşük verimi yükseltmek için, tasarlanan piezoelektrik rüzgar enerji hasat sistemine maksimum güç noktası izleme (MPPT) yöntemi uygulanmıştır. Böylece, tasarlanan sistemden maksimum güç elde edilmesi sağlanmıştır. Sistem, farklı rüzgar hızlarında test edilmiş ve en iyi çalışma noktasının bulunması için kademeli olarak değiştirilerek uygun çıkış yükü bulunmuştur. 1.75 m/s gibi düşük rüzgar hızlarında bile çalışabilen piezoelektrik rüzgar enerji hasat sistemi; düzeltme ve filtre ünitesi, depolama ve MPPT ünitesi ile düşük güç gerektiren makinelere enerji üretimi sağlayabilen bir sistemdir.

1.1. Titreşimden Enerji Hasatı Yöntemleri

Titreşim enerjisinden elektrik enerjisinin elde edilmesinde temel amaç, ortamdaki mevcut titreşim enerjisinden uygun dönüştürücü sistemler yardımı ile maksimum güç elde ederek; bu gücü elektronik devre ve mobil cihazların çalıştırılmasında kullanmak ve gerektiğinde depolayabilmektir. Genel anlamda titreşimden elektrik enerjisi elde etmede kullanılan yöntemleri elektromanyetik (indüktif) (Glynne-Jones ve ark., 2004); (Büren ve Tröster, 2007), elektrostatik (kapasitif) (Mitcheson ve ark., 2004); (Khbeis ve ark., 2009) ve piezoelektrik (Erturk, 2009); (Mitcheson ve ark., 2007) olmak üzere üç temel gruba ayırmak mümkündür.

1.1.1. Elektromanyetik enerji hasatı

Elektromanyetik enerji dönüşümü bobine dik yönde hareket eden bir hareketli mıknatısın bobin üzerinde gerilim indüklemesi ile meydana gelir. Bu mıknatısın göreceli salınım hareketi, bobinin içinde bir manyetik alan değişkenliğine neden olur. Bobinde indüklenen gerilim Faraday Kanunu ile belirlenebilir (Gherca ve Olaru, 2011); (Amirtharajah ve Chandrakasan, 1998).



Şekil 1.2. Elektromanyetik enerji hasat yöntemi

$$E = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad (1.1)$$

Denklemden E indüklenen elektromotor kuvvet, Φ_B ise manyetik akıdır. Mıknatıs kütlesinin bobine dik hareket etmesi durumunda, bobinde oluşan maksimum açık devre gerilimi aşağıdaki gibi olacaktır (Wang, 2019).

$$V_{oc} = NBl_b \frac{dy}{dt} \quad (1.2)$$

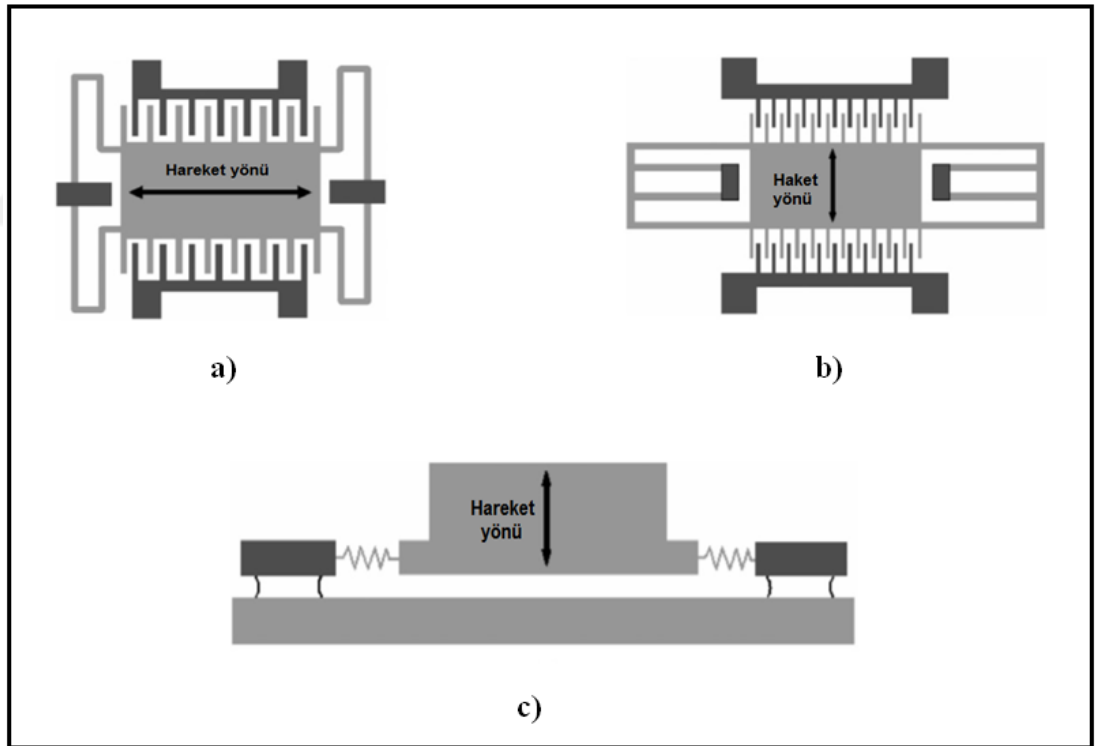
Burada, N bobindeki sarım sayısı, B manyetik akı yoğunluğu, l_b bobindeki bir sarımın uzunluğu ve y hareketli mıknatıs ile bobin arasındaki göreceli yer değiştirme mesafesidir. Gerilimin büyüklüğünün, bobine göre hareketli mıknatıs kütlesinin yer değiştirme hızı ile orantılı olduğu kolayca görülebilir.

1.1.2. Elektrostatik enerji hasatı

Elektrostatik (kapasitif) enerji hasat yöntemi, yalıtkan bir madde ile birbirinden ayrılan paralel plakaların arasındaki mesafenin değişmesi sonucu kapasitansın değişmesi ilkesine göre çalışmaktadır(Roundy ve ark., 2003); (Borno, 2008).Bu anlamı ile bu yapı bir kondansatör gibidir. Böyle bir kondansatörün gerilimi aşağıdaki şekilde olacaktır.

$$V = \frac{Qd_l}{\epsilon_0 lw} \quad (1.3)$$

Denklemden, Q kondansatör üzerindeki yükü, d_l levhalar arasındaki mesafeyi, l ve w sırasıyla levhaların boyu ve genişliği, ϵ_0 ise boşluğun dielektrik sabitidir.



Şekil 1.3. Elektrostatik enerji hasat yöntemleri; a) düzlem içi örtüşmeli, b) düzlem içi boşluk kaplamalı, c) düzlem dışı boşluk kaplamalı

Bu durumda kapasite ifadesi; kondansatörün gerilimi ve kondansatör üzerinde biriken yük ifadeleri yardımı ile aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$C = \frac{\epsilon_0 lw}{d_l} \quad (1.4)$$

Paralel plakalar arasındaki mesafenin titreşime bağlı olarak değişmesi ile kapasitenin değişeceği görülmektedir. Bu durumda kondansatör üzerinde depolanabilen enerji miktarı aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

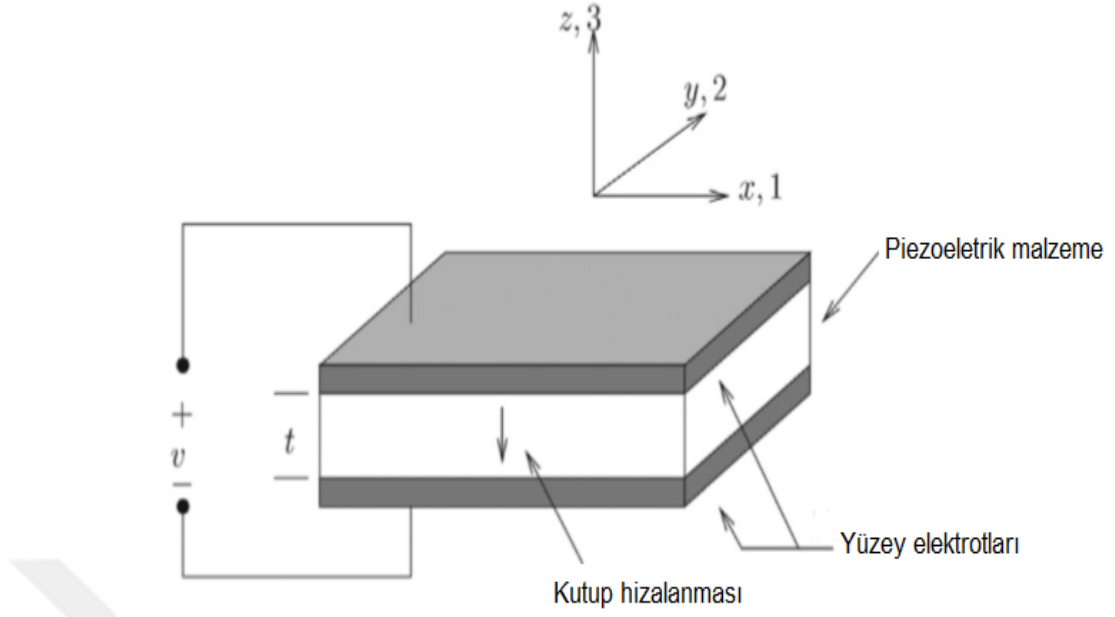
$$E = \frac{1}{2} QV = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{Q^2}{2C} \quad (1.5)$$

Elektrostatik enerji hasat yönteminde enerji dönüşümün başlayabilmesi için kondansatörün bir dış enerji kaynağına ihtiyaç duyması yani kondansatörün bir başlangıç gerilimine şarj olması bu tür sistemlerin en önemli dezavantajı olarak karşımıza çıkmaktadır(Roundy, 2003).

1.1.3. Piezoelektrik enerji hasatı

Titreşimden enerji elde etmede kullanılan bir diğer yöntem de bir piezoelektrik malzemenin özelliklerinden yararlanarak mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmektir. Piezoelektrik malzemeler bir mekaniksel kuvvet uygulandığında uçlarında bir elektrik potansiyel meydana getiren; aynı şekilde malzemenin kendisine birgerilim uygulandığında ise bir titreşim hareketi meydana getiren yapıdaki malzemelerdir.

Piezoelektrik malzemelerin bu özellikleri 1880 yılında Pierre ve Jacques Curie kardeşlerin yapmış oldukları çalışmalar ile detaylı olarak incelenmiştir(Roundy ve ark., 2002).Piezoelektrik yapıdaki malzemenin sıkışma-çekme şeklindeki mekanik enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesinde malzemenin bu özelliğine piezoelektrik etki, aynı şekilde piezoelektrik malzemeye bir alternatif gerilim uygulandığında ise uygulanan gerilimin frekansına bağlı olarak bir uzama-kısalma şeklinde malzemenin bir şekil değiştirmesi özelliği ters piezoelektrik etki olarak tanımlanır.Bu durumda elektrik enerjisi mekanik enerjiye dönüşmektedir (Tani ve Takogi, 1998);(Ballas, 2007).



Şekil 1. 4. Piezoelektrik enerji hasat yöntemi

Piezoelektrik malzemeden alınacak açık devre gerilimi aşağıdaki şekilde olacaktır.

$$V_{oc} = - \frac{dt}{\epsilon T} T \quad (1.6)$$

Bu denklemde; V_{oc} malzeme uçlarında meydana gelen açık devre gerilimi, d piezoelektrik malzemenin gerilme katsayısı, t malzemenin kalınlığı, ϵT piezoelektrik malzemenin dielektrik katsayısı ve T mekanik basıncı ifade eder.

Piezoelektrik enerji hasat yöntemi bu dönüştürücülerin az yer kaplamaları, istenilen seviyede gerilim sağlayabilmeleri, başlangıçta herhangi bir enerjiye ihtiyaç duymamaları gibi avantajları yanında sistemin pahalı olması, yüksek çıkış empedansları nedeniyle çok küçük akımlar üretmesi gibi bazı dezavantajları da vardır(Moheimani ve Fleming, 2006).

1.2. Enerji Hasat Yöntemlerin Karşılaştırılması

Çizelge 1.1.'de enerji hasat yöntemlerinin avantaj ve dezavantajlarının karşılaştırılması verilmiştir(Ali ve Nagib, 2012). Sistemlerin tasarımında kullanılacak yöntem seçilirken avantajları ve dezavantajları göz önünde bulundurarak tasarlamak gerekecektir.

Çizelge 1.1.Enerji hasat yöntemlerinin karşılaştırılması

Yöntem	Avantaj	Dezavantaj
Piezoelektrik	<ul style="list-style-type: none"> • Yüksek çıkış gerilimi • Küçük boyutlarda monte edilebilme • Başlangıçta enerji kaynağına ihtiyaç duyması • Enerji yoğunluğu yüksektir 	<ul style="list-style-type: none"> • Pahalı olması • Çıkış akımının düşük olması • Çok yüksek çıkış empedansı olması • Çabuk fiziksel bozulmaların olması
Elektrostatik	<ul style="list-style-type: none"> • Çıkış gerilimleri 2-10 Volt arasındadır. • Uzun ömürlü olması 	<ul style="list-style-type: none"> • Başlangıçta enerji kaynağına ihtiyaç duyması • Çıkış akımının düşük olması
Elektromanyetik	<ul style="list-style-type: none"> • Başlangıçta enerji kaynağına ihtiyaç duymaması • Yüksek güç çıkışı sağlar 	<ul style="list-style-type: none"> • Küçük boyutlarda monte edilmesi zordur • Çıkış gerilimleri 0.1-0.2V arasındadır

Çizelge 1.2.'de enerji hasat yöntemlerinin diğer bir karşılaştırılmaları da bu metod ve yöntemlerin kullanıldıklarında sağlayabildikleri en yüksek enerji yoğunlukları değerleri gösterilmektedir(Ortiz ve ark., 2013).

Çizelge 1.2.Enerji hasat yöntemleri için en yüksek enerji yoğunluğu değerleri

Tip	Enerji Yoğunluğu (mJ cm ⁻³)	Eşitlik	Kabuller
Piezoelektrik	35.4	$(1/2)\sigma_y^2 k^2 / 2c$	PZT 5H
Elektromanyetik	24.8	$(1/2)B^2 / \mu_0$	0.25 T
Elektrostatik	4	$(1/2)\epsilon_0 E^2$	$3 \times 10^7 Vm^{-1}$

Roundy ve arkadaşları enerji hasatı kaynakları ve metodları ve bu metodlar kullanılarak gerçekleştirilecek tasarımlardan elde edilebilecek enerji yoğunluklarını güç kaynağı cinsinden ve 1-10 yıllık ömür ölçeğinde yaptığı çalışma sonuçları Çizelge 1.3.'te vermiştir(Roundy ve Wright, 2004).

Çizelge 1.3. Enerji hasatı kaynakları ve yöntemlerinin güç kaynağı cinsinden karşılaştırılması

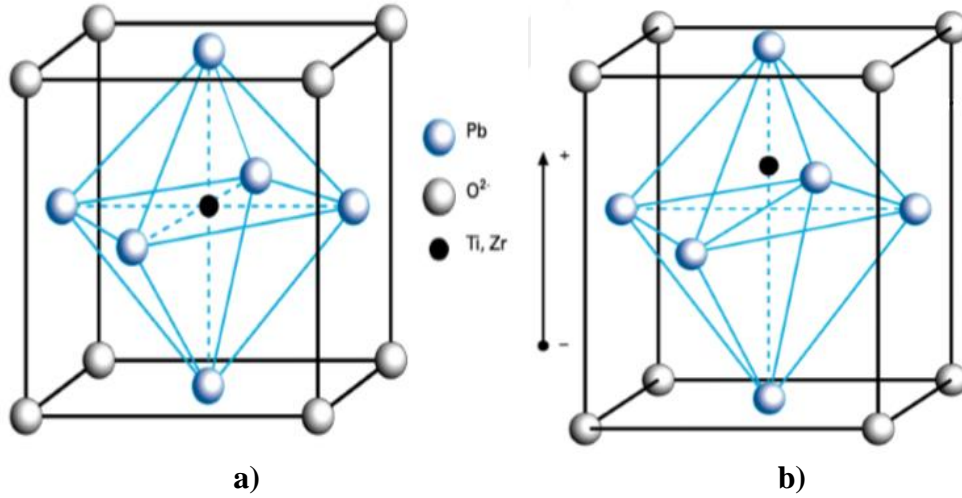
Güç Kaynağı	Güç Yoğunluğu ($\mu\text{W}/\text{cm}^3$) (1 Yıllık Ömür)	Güç Yoğunluğu ($\mu\text{W}/\text{cm}^3$) (10 Yıllık Ömür)
Güneş (Dış mekan)	15000-Doğrudan güneş 150-Bulutlu gün	15000-Doğrudan güneş 150-Bulutlu gün
Güneş (İç mekan)	6-Ofis masası	6-Ofis masası
Titreşim (Piezoelektrik dönüşüm)	250	250
Titreşim (Elektrostatik dönüşüm)	50	50
Akustik gürültü	0.003 at 75 dB 0.96 at 100 dB	0.003 at 75 dB 0.96 at 100 dB
Isıl gradyan	15-15 ⁰ C gradyanda	15-15 ⁰ C gradyanda
Ayakkabı tabanı	330	330
Piller (Şarj edilemeyen lityum)	45	3.5
Piller (Şarj edilebilen lityum)	7	0
Hidrokarbon yakıt (Mikro ısı makinası)	333	33
Yakıt hücresi (Metanol)	280	28

Çizelge 1.1., 1.2. ve 1.3.'te enerji hasat yöntemlerinin karşılaştırılmasına ve bu metodların enerji yoğunluklarına bakıldığında piezoelektrik enerji hasat yönteminin bazı avantajları bakımından diğer enerji hasat yöntemlerinden daha üstün olduğunu söyleyebiliriz.

Titreşimden elektrik enerjisi elde etmede kullanılan bu yöntem ve metodların beraber kullanıldığı sistemlerde mevcuttur. Burada amaç en yüksek verimde maksimum güçte elektrik enerjisi elde etmektir.

1.3. Piezoelektrik Malzemeler

Piezoelektrik seramikler perovskit yapıda olan malzemelerdir. Bu seramik kompozisyonları perovskit(ABO_3)yapısında olan malzemelerdir. Kalsiyum Titanat ($CaTiO_3$) mineraline verilen isimdir. $PbTiO_3$, $BaTiO_3$ ve $KNbO_3$ gibi piezoelektrik malzemelere de perovskit yapıdaki malzemeler denir. En çok kullanılan ve yaygın olarak bilinen piezoelektrik seramik kompozisyonu yapıda olarak Kurşun Zirkonat Titanat (PZT) tır. Perovskit yapısına sahip bu piezoelektrik malzemelerin genel formülü (ABO_3) şeklindedir. Bu yapıda O oksijeni ifade ederken sırasıyla A ve B de pozitif yüklü iyonları temsil etmektedir.



Şekil 1.5. Perovskit yapıya sahip kurşun zirkonat titanat'ın (PZT) kristal yapısı a) kristalin kübik yapısı b) kristalin dikdörtgensel yapısı

Şekil 1.5.'te kurşun zirkonat titanat'ın (PZT) kristal yapısı gösterilmiştir[36]. Bu kristal yapıda (Pb), +2 pozitif yüklü iyon (kurşun), (Ti, Zr), +4 pozitif yüklü iyon (tityanyum, zirkonyum) ve O ise -2 yüklü oksijen iyonunu temsil etmektedir. Perovskit yapıya sahip piezoelektrik malzemeler, Curie sıcaklığı olarak bilinen sıcaklık değerinin üzerinde paraelektrik kübik bir yapıda iken, curie sıcaklığının altında ise ferroelektrik dikdörtgensel kristal yapısına sahip olurlar.

Paraelektrik fazdan ferroelektrik faza geçiş olarak tanımlanan ve malzemenin kristal yapısındaki bu şekil değişikliğine kendiliğinden deformasyon denir(Joon Kim ve ark., 2010).

1.4. Piezoelektrik Etkinin Oluşumu

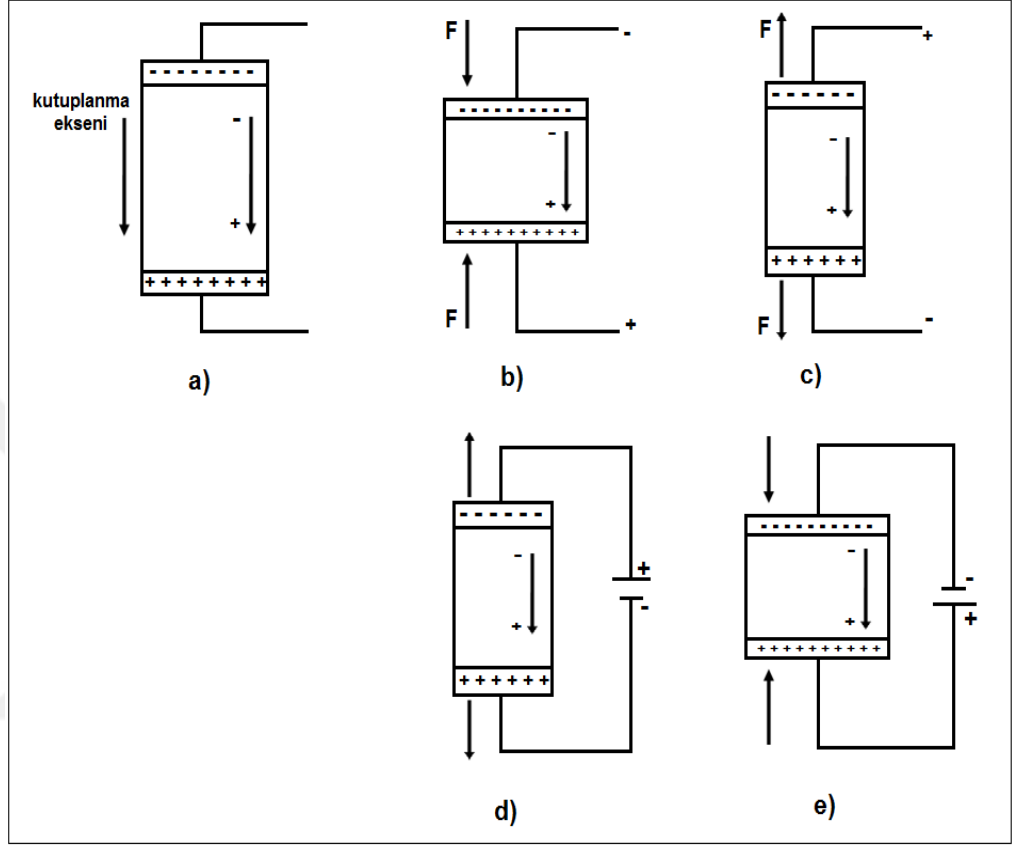
Piezoelektrik malzemeler uygulanan mekanik kuvvete ve maruz kaldıkları elektriksel gerilimlere göre çeşitli şekillerde tepkiler veren kristal yapıdaki malzemelerdir. Kristal yapıdaki bu malzemelerin simetri özelliğinin olup olmaması piezo yapı için en önemli etkidir. Simetri özelliği olan maddelerde piezoelektrik özellik meydana gelmez(Ballato, 1996).

Simetri özelliği olan bir maddenin son yörüngesinde bulunan elektronlar çekirdek tarafından daha fazla çekimle çekildiklerinden bu maddelerdeki pozitif ve negatif iyonların kutuplanması çok zor olmaktadır. Simetri özelliği gösteren bu maddeler elektrik alanı oluşturamadıklarından bu maddeler piezoelektrik özellik göstermezler. Kristal yapıdaki bir piezoelektrik malzemede pozitif ve negatif parçacıklar eğer bir kutuplanma yoksa bu parçacıklar madde içerisinde dengededir. Denge durumundaki bu yapı elektriksel olarak nötraldir.

Yüksüz durumdaki bu malzemelere dışarıdan bir mekanik kuvvet uygulandığında maddenin karşılıklı bulunan yüzeylerinde (+) olan pozitif, (-) olan negatif zıt durumdaki yüklerin meydana gelmesine neden olur. Malzeme yapısındaki iyonların bir eksen yönüne göre şekil alarak dizilmesine kutuplanma denir. Piezoelektrik malzemeler Curie sıcaklığının biraz altında bir sıcaklıkta kuvvetli bir elektrik alan uygulanarak malzemeler kutuplandırılır.

Şekil 1.6.'da bir piezoelektrik malzemenin kutuplanmış şekli gösterilmiştir(Quin-Hua, 2013). Piezoelektrik malzemenin sıkıştırılması veya gerilmesi ile mekanik enerji elektrik enerjisine dönüşür. Malzemenin gösterdiği bu özelliğe piezoelektrik etki denir. Şekil 1.6.(b) ve (c)'de aynı şekilde piezoelektrik malzemeye kutuplanma ekseninin aynı yönünde veya zıt yönünde bir gerilim

uygulanması neticesinde malzemede mekaniksel şekil değişiklikleri meydana gelir. Malzemenin gösterdiği bu özelliğe de ters piezoelektrik etki denir. Şekil 1.6.(d) ve (e)'de durumunda ise elektrik enerjisi mekanik enerjiye dönüşmektedir.



Şekil 1.6. Piezoelektrik malzemelerde doğrudan ve ters piezoelektrik etkinin gösterimi a) kutuplanmış piezoelektrik malzeme, b) kutuplanma yönünde sıkıştırılan malzemenin elektron hareketi ve üretilen enerji, c) kutuplanma yönünde gerilen malzemenin elektron hareketi ve üretilen enerji, d) kutuplanma gerilimi ile aynı yönde uygulanan gerilim sonucu malzemenin şekli, e) kutuplanma gerilimi ile zıt yönde uygulanan gerilim sonucumalzemenin şekli

İlk olarak kullanılan piezoelektrik kristal malzeme kuvarstır. Kuvars mevcut kristal yapısı, kimyasal kararlılığı, kullanım sırasında dayanıklılığı ve sorun çıkarmaması gibi nedenlerden dolayı en çok bilinen ve kullanılan piezoelektrik yapıdaki malzeme olmuştur. İlerleyen teknoloji ile birlikte seramik oksit ve alaşımlardan yapılan bir çok piezoelektrik malzemeler üretilmektedir. En çok kullanılan piezoelektrik seramik şeklinde bulunan $BaTiO_3$ ve PZT gibi malzemeleridir. Bu yapıdaki malzemelerin çalışma durumları incelenirken Curie

sıcaklığı dikkate alınmalıdır. Bu sıcaklığın üstünde malzemelerin piezoelektrik etkinliği tümüyle yok olur(Chaojie ve ark., 2018).

1.5. Piezoelektrik Enerji Hasatı Genel Eşitlikleri

Piezoelektrik dönüştürücüler ve hasat yöntemleri piezoelektrik etki olarak tanımlanan ve mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmek için kullanılan sistemlerdir. Öte yandan, piezoelektrik hasat sistemleri aynı zamanda, elektrik enerjisini mekanik enerjiye de dönüştürebilirler bu tanımlamaya da ters piezoelektrik etki denir. Şekil 1.7.'de bir piezoelektrik dönüştürücünün şematik diyagramı gösterilmektedir; şekilde gösterilen 3 eksen piezoelektrik malzemenin başlangıç polarizasyonunun yönünü göstermektedir. Bir doğrusal piezoelektrik malzemenin elektriksel ve mekaniksel özelliklerini tanımlayan yapısal eşitlik ve denklemler aşağıdaki gibi (Hegewald, 2000); (Meitzler ve ark., 1988) yazılabilir.

$$\{T\} = [C^E] \{S\} - [e^t] \{E\} \quad (1.7)$$

$$\{D\} = [e] \{S\} + [\varepsilon^S] \{E\} \quad (1.8)$$

Burada, $[C^E]$ sabit elektrik alan kuvveti ile değerlendirilen elastik bileşenlerin matrisi, $\{S\}$ gerinim vektörü, $[e]$ piezoelektrik gerilme sabitlerinin matrisi, $\{E\}$ elektrik alan vektörü, $[\varepsilon^S]$ sabit basınç altında dielektrik sabiti matrisi, $\{T\}$ gerilme vektörü ve $\{D\}$ elektrik akı yoğunluğudur.

Burada (1.7) denklemi ters piezoelektrik etkiyi, (1.8) ise doğrudan piezoelektrik etkiyi tanımlamak için kullanılır.

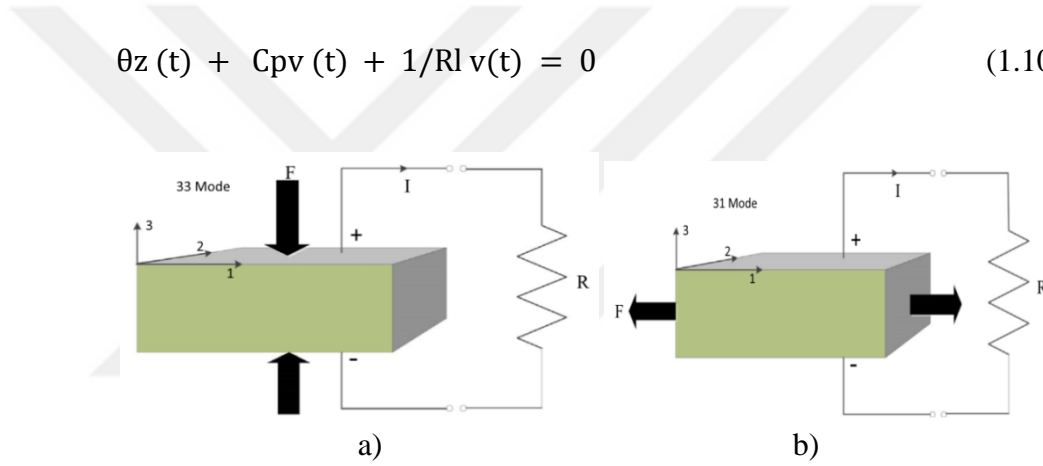
Şekil 1.7.'de piezoelektrik dönüştürücüler için iki ortak bağlantı modu gösterilmiştir. Piezoelektrik malzemelerin elektrik ve mekaniksel özellikleri ile bu malzemelerin davranışları etraftan uygulanan elektrik alanının uygulama eksenleriyle bağlantılıdır. Bağlantı modları ve eksenlerine numara vererek bu malzemelerin özellikleri belirlenebilir.

Şekil 1.7.(a)'da '33' modunda, çekme veya basma kuvveti kutuplanma yönü boyunca uygulandığında, yükler elektrot yüzeyinde toplanır.

Şekil (1.7.(b)'de ise '31' modunda malzeme kutuplama yönüne dik olarak gerildiğinde yükler elektrot yüzeyinde toplanır. DuToit ve Wardle '33' modunu kullanarak malzemenin elektromekanik davranışını aşağıdaki denklemlerle yardımı ile açıklamışlardır (Roundy ve Wright, 2004), (Sodano ve ark., 2004);(Du Toit, 2005).

$$mz(t) + dmz(t) - kz(t) - \theta v(t) - my = -my(t) \quad (1.9)$$

$$\theta z(t) + C_p v(t) + 1/R_l v(t) = 0 \quad (1.10)$$



Şekil 1.7. Piezoelektrik malzemelerde '33' ve '31' modların gösterimi

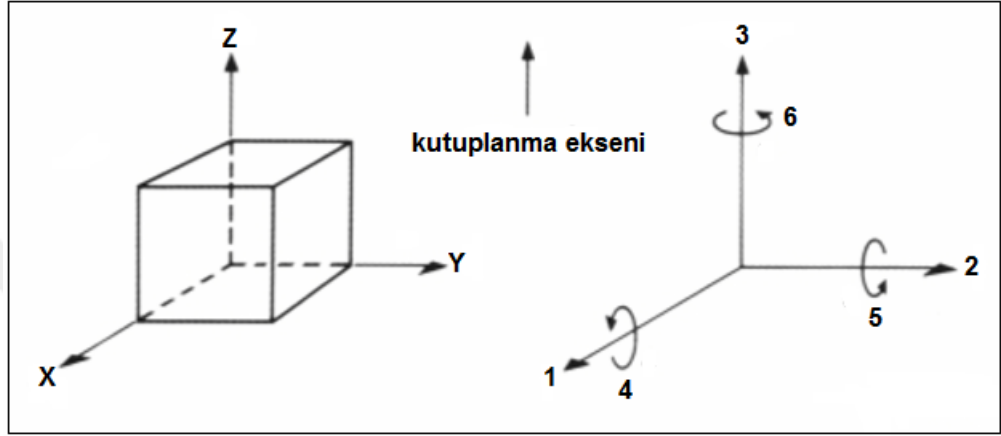
R_l yük direnci, C_p piezoelektrik malzemenin kapasitansı, θ elektromekanik bağlantı değeridir.

1.6. Piezoelektrik Malzemelerin Özelliklerini Etkileyen Sabitler

Piezoelektrik malzemelerin kullanım alanları ilerleyen teknoloji ile beraber yaygınlaşınca uygulama için kullanılacak malzemelerin seçimi ve bu malzemelerin performansını etkileyen sabitler ve çeşitli katsayıların ne anlama geldiği ve bunların hesaplamalarda nasıl kullanılacağı ile ilgili geniş ve kapsamlı incelemeler yapmak gerekmektedir. Piezoelektrik malzemeler için kullanılan bu sabitler ve ifadelerde yer alan alt indisler ve belirtilen eksenler malzemelere uygulanan herhangi bir mekanik

ve elektriksel etkinin doğrultusu ile ilgili detaylı bilgi verirler. Piezoelektrik malzemelerin eksen ve alt indisleri Şekil 1. 8.'de verilmiştir(Haris ve ark., 2013).

Burada gösterilen x, y ve z eksenleri sırasıyla 1, 2 ve 3 alt indislerini ifade ederken, herhangi birinde oluşabilecek yada meydana gelebilecek eksen kayması ise sırasıyla 4, 5 ve 6 alt indisleriyle verilir.



Şekil 1.8. Piezoelektrik malzemelerin sabitleri için kullanılan indis ve eksenler

1.6.1. Piezoelektrik yük sabiti (d)

Gerinim katsayısı yada piezoelektrik şarj sabiti olarak ta bilinen piezoelektrik yük sabiti d , şeklinde bir matrisle ifade edilir. Bir piezoelektrik malzemeye uygulanan birim mekanik gerilme sonucu meydana gelen elektrik alan veya piezoelektrik malzemeye birim elektrik alan uygulanması sonucunda meydana gelen mekaniksel gerinim şeklinde tanımlanır. Sabitte bulunan ilk alt indis, uygulanan potansiyel farktan meydana gelen elektrik alanını yada ortaya çıkan potansiyel fark ile oluşan elektrik yüklerinin yönünü ifade ederken; sabitteki ikinci alt indis ise uygulanan mekanik gerilme yada ortaya çıkan gerinimin yönünü ifade eder.

Piezoelektrik malzemede elde edilecek gerilme, uygulanacak elektrik alanın büyüklüğüne ve piezoelektrik yük sabiti d değerine bağlı olduğundan malzemenin gerilme ile ilgili kullanımlarında bu değer oldukça önemlidir. Piezoelektrik yük katsayısı, malzemenin elektrik ve mekanik özellikleri ile bu özelliklerin birbirleriyle etkileşimlerini belirlemektedir. Denklem (1.11) ve (1.12)'de piezoelektrik

malzemenin doğrudan piezoelektrik etki durumunda ve ters etki durumunda piezoelektrik yük sabiti denklemleri verilmiştir.

Formüllerde, T mekanik gerilme sonucu meydana gelen polarizasyonu, S malzemeye uygulanan birim elektrik alan sonucu meydana gelen mekanik gerilmeyi, D malzemeye uygulanan birim elektrik yükünü, E ise burada elektriksel alanı ifade etmektedir.

Doğrudan piezoelektrik etki,

$$d_{ij} = \left(\frac{\partial D_i}{\partial T_j}\right)^E \quad (1.11)$$

Ters piezoelektrik etki;

$$d_{ij} = \left(\frac{\partial S_i}{\partial E_j}\right)^T \quad (1.12)$$

d_{33} : 3 yönünde birim basınç uygulandığında 3 yönünde oluşan elektrik yüklenmesi veya 3 yönünde birim elektrik alan uygulandığında 3 yönünde oluşan gerilmedir.

d_{31} : 1 yönünde birim basınç uygulandığında 3 yönünde oluşan elektrik yüklenmesi veya 3 yönünde birim elektrik alan uygulandığında 1 yönünde oluşan gerilmedir.

d_{15} : 2 yönünde uygulanan birim kaydırma basıncına karşın 1 yönünde oluşan elektrik yüklenmesi veya 1 yönünde uygulanan birim elektrik alana karşın 2 yönünde oluşan kaydırma gerilmesidir.

Ters piezoelektrik etki durumunda, kutuplanma yönüne ters yani 3 eksen yönünde uygulanan elektrik alan, piezoelektrik malzemede 1 eksen yönünde pozitif gerilme meydana getireceğinden dolayı d_{31} katsayısı genellikle negatif bir sayıdır.

1.6.2. Piezoelektrik gerilim sabiti (g)

Piezoelektrik gerilim sabiti, potansiyel fark sabiti olarak da genellikle bilinir ve g_{ij} şeklinde gösterilir.

Doğrudan piezoelektrik etkide malzemede oluşan birim elektrik alanın mekanik gerilmeye oranı şeklinde açıklanır. Ters piezoelektrik etkide ise piezoelektrik malzemeye uygulanan birim elektrik sonucu meydana gelen mekanik gerinimdir. i eksenine uygulanan mekanik gerilmenin ya da meydana gelen gerinimin yönünü, j eksenine ise uygulanan elektrik yükünün ya da ortaya çıkan elektrik alanın yönünü ifade etmektedir. Denklem (1.13) ve eşitlik (1.14)'te piezoelektrik malzemenin doğrudan piezoelektrik etki durumunda ve ters etki durumunda piezoelektrik gerilim sabiti denklemleri verilmiştir.

Doğrudan piezoelektrik etki;

$$g_{ij} = \left(\frac{\partial E_i}{\partial T_j} \right)^D \quad (1.13)$$

Ters piezoelektrik etki;

$$g_{ij} = \left(\frac{\partial S_i}{\partial D_j} \right)^T \quad (1.14)$$

g_{31} , 1 yönünde birim basınç uygulandığında 3 yönünde elde edilen elektrik alan veya 3 yönünde birim elektrik gerilimi uygulandığında 1 yönünde elde edilen gerilmedir.

g_{33} , 3 yönünde birim basınç uygulandığında 3 yönünde oluşan elektrik alan veya 3 yönünde birim elektrik gerilimi uygulandığında 3 yönünde elde edilen gerilmedir.

g_{15} , 2 yönünde birim kaydırma basıncı uygulandığında 1 yönünde elde edilen elektrik alan veya 1 yönünde birim elektrik gerilimi uygulandığında 2 yönünde elde edilen kaydırma gerilimidir.

1.6.3. Etkileşim sabiti (k)

Etkileşim sabiti elektromekanik etkileşim katsayısı olarak da ifade edilir ve k_{ij} şeklinde gösterilir. Oluşan mekanik enerjinin uygulanan elektrik enerjisine dönüşüm oranıdır. Yani, başka bir deyişle, bir piezoelektrik malzemenin elektrik enerjisini mekanik enerjiye veya mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürme verimliliğidir. Burada ilk alt indis i , uygulanan veya oluşan elektriğin yönünü, ikinci alt indis j ise uygulanan kuvvetin ya da gerilmenin yönünü temsil eder. Verimli bir enerji dönüşümü elde etmek için elektromekanik etkileşim katsayısı k değerinin yüksek olması istenir. Denklem (1.15) ve (1.16)'da etkileşim sabitlerine ait denklemler verilmiştir.

Doğrudan piezoelektrik etki;

$$k = \sqrt{\frac{\text{Meydana Gelen Elektrik Enerjisi}}{\text{Uygulanan Mekanik Enerji}}} \quad (1.15)$$

Ters piezoelektrik etki;

$$k = \sqrt{\frac{\text{Meydana Gelen Mekanik Enerji}}{\text{Uygulanan Elektrik Enerjisi}}} \quad (1.16)$$

1.6.4. Elastik uygunluk sabiti (S)

Esneklik katsayısı olarak ta bilinen elastik uygunluk sabiti, piezoelektrik malzemede oluşan gerininin uygulanan mekanik gerilmeye oranı şeklinde ifade edilir. Elastik uygunluk sabiti S_{ij} ile gösterilir. Burada ilk alt indis i , oluşan gerininin yönünü, ikinci alt indis olan j ise malzemeye uygulanan mekanik gerilmenin yönünü ifade eder.

Bu katsayı malzemenin mekanik özelliklerinin yanında gerinim, gerilmenin yönü ve elektriksel özelliklere de bağlıdır. S^E sabit bir elektrik alandaki, S^D sabit bir elektrik gerilimi altındaki elastik uygunluk sabitini ifade eder. Elastik uygunluk sabiti piezoelektrik malzemeler için kullanılan ve mekaniksel katılık anlamına gelen young module (Y) kavramının tersidir.

$$S = \frac{1}{Y} = \frac{\text{Gerinim}}{\text{Gerilme}} \left(\frac{m^2}{N} \right) \quad (1.17)$$

S^E_{11} : Sabit elektrik alan altında 1 yönündeki uygulanan gerilme sonucu yine 1 yönünde oluşan gerinimi ifade eder.

S^D_{33} : Sabit elektrik gerilimi altında 3 yönündeki uygulanan gerilme sonucu yine 3 yönünde oluşan gerinimi ifade eder.

1.6.5. Dielektrik sabiti (ϵ)

Elektriksel geçirgenlik yada manyetik geçirgenlik sabiti olarak da bilinen dielektrik sabiti genel olarak bir tensör olup ϵ_{ij} şeklinde gösterilir. Malzemenin elektriksel geçirgenliğinin ortamın elektriksel geçirgenliğine oranıdır. Elektriksel geçirgenlik, piezoelektrik malzemeye uygulanan elektrik alan sonucubirim alanda oluşan yük miktarı olarak tanımlanır. ϵ^T , sabit gerilme altındaki elektriksel geçirgenliği ve ϵ^S sabit gerinim altındaki elektriksel geçirgenliği ifade eder. İlk alt indisi i , elektriksel geçirgenlik yönünü yada oluşan yük miktarının doğrultusunu, ikinci alt indisi j ise elektrik alanının doğrultusunu göstermektedir. Denklem (1.18)' de dielektrik sabitine ait denklem verilmiştir. (ϵ_0 boşluğun elektriksel geçirgenliği= $8,85 \cdot 10^{-12}$ farad/metre)

$$K = \frac{\text{malzemelerin elektriksel geçirgenliği}}{\text{boşluğun elektriksel geçirgenliği}} = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (1.18)$$

Piezoelektrik gerinim yada yük sabiti, piezoelektrik gerilim sabiti ve dielektrik sabiti arasındaki ilişki ise Denklem (1.19)'daki gibidir.

$$g = d/\epsilon \quad (1.19)$$

ϵ_{11}^T Sabit gerilme altında 1doğrultusunda oluşan elektriksel yük miktarını ve geçirgenliği;

ϵ_{33}^S ise sabit gerilim altında 3doğrultusunda oluşan yük miktarını ve elektrik alanının geçirgenliğini ifade eden katsayıdır.

1.6.6. Mekanik kalite sabiti (Q_m)

Mekanik kalite sabiti Q_m ile gösterilir. Malzemelerin frekans eğrilerine bakılarak belirlenebilen mekanik kalite sabiti; mekanik çevirim için oluşan enerjinin tekrar mekanik çevirim başına harcanan enerjiye oranı şeklinde tanımlanır(Türker, 2009);(Korkmaz, 2015).

1.7. Piezoelektrik Malzemelerin Sınıflandırılması

Son zamanlarda gelişen malzeme teknolojisi ile beraber günümüzde farklı malzeme yapılarında üretilmiş çok sayıda ve çeşitte piezoelektrik malzemeye rastlamak mümkündür. Piezoelektrik malzeme yapıları üretildiği malzemelerin çeşidine, üretim yöntemlerine ve sahip oldukları fiziksel şekillerine göre sergiledikleri piezoelektrik ve mekanik davranışlar yönünden de çok fazla farklılıklar göstermektedirler. Herhangi bir uygulamada hangi yapının kullanılacağına belirlenmesinde bu piezoelektrik malzemelerin özelliklerinin detaylı olarak bilinmesi ve incelenmesi gerekmektedir.

Piezoelektrik malzemeleri genel olarak organik, inorganik ve piezo kompozit yapılar şeklinde sınıflandırabiliriz. Ancak bu yapıların çok fazla farklılıklara sahip olması bu malzemelerin birden fazla şekilde sınıflanmalarını ortaya çıkarmıştır.

Günümüzde piezoelektrik malzemeler sahip oldukları farklılıklara rağmen üç farklı grup altında incelenebilir:

- Piezoelektrik kristaller-seramikler (kuvars, rochelle tuzu, kurşun zirkonat titanat, baryum titanat, vb.)
- Piezoelektrik polimerler (naylon, vinilidin florür, vb.)
- Piezoelektrik kompozitler

Piezoelektrik malzemelerin gösterdikleri birçok farklı özellik ve sergiledikleri davranışlardan dolayı her grup farklı çalışma alanlarında tercih edilmektedirler.

1.7.1. Piezoelektrik kristaller-seramikler

İnorganik piezoelektrik malzemeler olarak ta sınıflandırılan bu yapılar, tek kristalli ve çok kristalli olarak iki gruba ayrılabilen bu piezoelektrik malzemeler tabiatta ilk keşfedilen piezoelektrik malzemelerdir (Sevgi, 2009). En yaygın kullanılan tek kristalli piezoelektrik malzeme ve yapılar kuvars, rochelle tuzu, turmalin, lityum niyobat (LiNbO_3) ve lityum tantalat (LiTaO_3) olarak sıralanabilir.

Oldukça iyi piezoelektrik özelliklere sahip olmalarından dolayı en yaygın kullanım alanı olan piezoelektrik seramik yapıdaki baryum titanat (BaTiO_3) ve kurşun zirkonat titanat (PZT) çok kristalli piezoelektrik malzemelere örnek verilebilir. Piezoseramikler bir takım katkı maddelerinin eklenmesi ile bu malzemelerin kompozisyonları istenildiği gibi değiştirilebilmektedir. Katkı maddesine göre bu malzemeler yumuşak seramik (yumuşak PZT) ve sert seramik (sert PZT) şeklinde ikiye ayrılırlar. Bu malzemelerin kutuplanması için kullanılan elektrik alanı 1 kV/mm 'den büyükse bu malzeme sert (PZT), eğer bu uygulanan elektrik alan 0.1 ile 1 kV/mm değerleri arasında ise bu malzemeye de yumuşak (PZT) denir (Tressler ve ark., 1998). Yumuşak ve sert seramik malzemelerin bir birine göre çok fazla avantaj ve dezavantajları mevcuttur. Çizelge 1.4.'te bu yapıdaki malzemelerin karşılaştırılması verilmiştir (Giurgiutiu ve Lyshevski, 2009); (Heywang ve ark., 2008).

Çizelge 1.4. Yumuşak ve sert piezoelektrik seramiklerin bazı özellik ve karakteristiklerin karşılaştırılması

Özellik/karakteristik	Birim	Yumuşak Piezoseramik	Sert Piezoseramik
Piezoelektrik yük sabiti	$d_{33} \ 10^{-12} \frac{C}{N}$	400-650	120-350
Piezoelektrik gerilim sabiti	$g_{33} \ 10^{-3} \frac{Vm}{N}$	16-33.1	12-29
Bağıl dielektrik kat sayısı	ϵ_r	1350 - 4200	950 - 1650
Bağlanma katsayısı	k_p	0.48 - 0.68	0.30 - 0.62
Mekanik kalite faktörü	Q_m	50 - 100	1000 - 2000
Elektriksel direnç	Ω	Çok yüksek	Daha düşük
Dielektrik kayıplar		Daha yüksek	Daha düşük
Kutuplanma/kutuplanmayı bozma		Daha kolay	Daha zor

Piezoseramik olarak adlandırılan bu malzemeler yüksek piezoelektrik özelliğe ve yüksek dielektrik katsayıya sahiptirler. Tek kristal yapıdaki piezoelektrik malzemeler sensör, osilatör ve akustik devre uygulamalarında, çok kristalli yapıdaki piezoelektrik malzemelerin ise yüksek ve düşük sıcaklık isteyen uygulamalarda kullanılabilir olmaları büyük bir avantaj sağlamaktadır (Uchino, 2000).

1.7.2. Piezoelektrik polimerler

Organik piezoelektrik malzemeler olarak ta bilinen bu malzemeler poliviniliden florid (PVDF) veya piezoelektrik polimerler olarak bilinen bu yapılar florin karbon esaslı polimerlerden meydana gelirler. Polimer piezoelektrik malzemeler düşük piezoelektrik sabiti ve yüksek gerilim sabiti ile beraber düşük empedansa sahiptirler. Bu malzemelerin hafif ve esnek bir yapısı vardır. Bu malzemelerin yüksek sıcaklık gerektiren uygulamalar için uygun değildir. Piezoelektrik polimerler mikrofonlarda, denizaltı ultrasonik yön bulma ve mesafe ölçümleri gibi değişik uygulamalarda kullanılmaktadırlar.

1.7.3. Piezoelektrik kompozitler

Piezoelektrik kompozitler seramik malzemelerin pasif bir polimer ile birleştirilmesi ile oluşturulan malzemelerdir. Bu birleştirilme sayesinde çok çeşitli piezoelektrik kompozit elde etmek mümkündür. Bu yapıdaki malzemelerin en önemli avantajları yüksek değerde etkileşim sabitine, düşük empedans, mekanik

esneklik ve dayanıklılığa sahip olmaları olarak sıralanabilir. Kompozit yapılar yüksek piezoelektrik özelliğe, yüksek dayanıklılığa, istenilen formda ve büyüklükte üretilebilme ve şekil alma özelliğine sahiptirler(Cook-Chennault ve ark., 2008); (Kong ve ark., 2014). Bu malzemelerin esnek yapıları sayesinde neredeyse bütün yüzeylere basit bir şekilde monte edilebilirler. Kompozit malzemeler esnek yapılarından dolayı enerji üreten insan giysilerinde, tıbbi uygulamalar, denizaltı sonarlarda ve akış sistemlerin kontrolünde kullanılmaktadırlar.

1.8. Piezoelektrik Malzemelerin Uygulama Alanları

Piezoelektrik malzemelerin enerji üretme özelliği nedeniyle gerek piezoelektrik etkinin kullanıldığı gerekse de ters piezoelektrik etkinin kullanıldığı birçok uygulamayla karşılaşmak mümkündür. Mutfak ocakları, gazlı ısıtıcıların ve çakmakların ateşlenmesi, basınç sensörleri ve hareket kontrolü uygulamaları, müzikal enstrümanlar ve trafik sensörleri, mikrofonlar, denizaltı sonar cihazlarda, ultrasonik motorlarda, robotik ve uydu çalışmalarında, köprü bina ve sokak aydınlatmalarında, insan hareketlerinden enerji üreten elbiselerde, uçak ve insansız hava araçlarının kontrolünde, tıbbi teşhis uygulamaları gibi birçok uygulama alanında piezoelektrik malzemeler kullanılmaktadır(Moheimani, 2006).

Köprülerin değişik ek yerlerine yerleştirilen piezoelektrik malzeme ve sistemler yardımıyla meydana gelen titreşimin kontrolü sağlanarak sistem yardımıyla elektrik enerjisi üretilebilmekte ve bu enerji ile köprülerin, binaların ve sokakların aydınlatılması da yapılabilmektedir.

Birçok ticari şirket değişik kompozit piezoelektrik malzemeler kullanarak; tenis raketleri, bilgisayar klavyeleri, spor kayakları ve değişik müzikal araç ve gereçler üretmişlerdir. Bu ürünler de titreşimi azaltmak için piezoelektrik malzemeler ve dönüştürücüler kullanılmaktadır. Kullanıcılarına yüksek kalitede konfor, daha iyi kullanım ve yüksek derecede performans sağlayarak büyük ticari kazançlar elde etmektedirler(Bianchini ve ark., 1998).

Piezoelektrik malzemeler ses uygulamalarında da oldukça geniş bir uygulama alanına sahiptirler. Üretilen mikrofonlar ve değişik ticari pikaplar bu uygulamaların temelini oluşturur. Frekans bant aralığı ve bant genişliği, bozulma oranına ve mikrofon hassasiyeti gibi değerler kullanılan piezoelektrik malzemeler sayesinde daha hassas üretilmektedir(Hillenbrand ve Sessler, 2004).

Otoban ve yolların durumu, yoğunluğu, araç sayısı ve araç tipleri, tonaj ağırlıkları gibi bilgiler yolların değişik yerlerine yerleştirilen piezoelektrik malzemelerin titreşim hareketlerinin kontrolü sağlanarak kontrol merkezlerinin bu bilgilere daha güvenli ve hızlı ulaşması sağlanabilmektedir(Patel ve Uzun, 2011).Yeni nesil akıllı bina teknolojileri ve mühendislik bina yapılarının içerisine gömülen piezoelektrik malzemeler ve kullanılan kablosuz sensörler sayesinde deprem, yer sarsıntıları ve afetlerde bu malzemelerin hareket ve titreşimlerinin kontrolü sayesinde farklı güvenlik ve kurtarma sistemleri oluşturulmuştur.

Piezoelektrik malzemeler; tıbbi görüntüleme ve ölçüm cihazlarında, kalp pillerinde, tansiyon ve şeker ölçümü test cihazlarında, ses mikrofon ve hoparlörlerinde, deniz altı sonarlarda, ultrasonik motorlardave akustik emisyon gibi değişik özellikteki sensör yapılarında bu malzemelerin kullanıldığı uygulamalar mevcuttur (Chunsheng, 2011); (Gu ve ark., 1994).

Çeşitli piezoelektrik malzemeler kullanılarak arabalar, uçaklar ve insansız hava araçları gibi hareket halinde titreşim meydana getiren araçlarda, insanların üzerinden geçtiği zemin ve yüzeylerden, insan hareketlerinden enerji üreten elbise ve giysilerde, elektrik motorları, transformatörler ve fanlar gibi gürültü ve titreşim sağlayan makinelerin titreşiminden, otoban ve tünellerin değişik bölümlerinde, hızlı trenler, metro ve tramvayların ray ve güzergahlarında, rüzgâr, yağmur, deniz dalgaları ve su akıntıları gibi doğa olaylarından elde edilen titreşim ve hareketlerden çeşitli yöntem ve metotlar ile piezoelektrik malzemeler kullanılarak elektrik enerjisi üretilmektedir. Son yıllarda piezoelektrik malzeme tabanlı uygulamalardan maksimum güç elde ederek düşük güç tüketimi gerektiren elektronik devrelerin beslenmesi ile ilgili uygulamalar oldukça ilgi çekmektedir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Piezoelektrik malzemelerin 1800 yılların sonunda keşfedilmesinden sonra bu malzemelerin kullanıldığı enerji ve güç üretimi ile ilgili endüstriyel ve akademik pek çok çalışmaya rastlamak mümkündür.

Piezoelektrik uygulamalarında malzemenin titreştirilmesiyle oluşan sinyal sinüsoidal sinyale benzemektedir. Bundan dolayı enerjinin kullanılması ve depo edilebilmesi için öncelikle bu sinyalin bir doğrultma işlemi ile doğrultulması gerekecektir. Piezoelektrik hasat sistem uygulamalarında maksimum güç transferinin olabilmesi için üreteç ve alıcı empedanslarının eşit yada bir birine yakın olması gerekmektedir.

Piezoelektrik malzemeler kullanılarak enerji üreten tasarım ve sistemlerin gelişim sürecine baktığımızda ilk çalışmaların hangi devre elemanların kullanılacağı ve tasarım topolojileri üzerine çalışmalar olduğunu ve bu aşamaya kadarki çalışmalarda kullanılan sistem ve tasarımların verimlerinin düşük olmalarından dolayı herhangi bir ortamda kullanılmadığını görüyoruz.

Bu aşamaya kadar ki çalışmalara örnek olarak aşağıdaki çalışmaları verebiliriz. Häsler ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada (Häsler ve ark., 1984), bir köpeğin nefes alma verme sırasında, göğüs kafesi hareketinin enerji olarak kullanılmasına yönelik bir çalışmadır. Gerçekleştirilen uygulamada elde edilen maksimum gerilim değeri 18 V ve elde edilen güç miktarı ise 17 μ W'dır.

Ramsey ve Clark tarafından gerçekleştirilmiş bir başka uygulamada (Ramsey ve Clark, 2001), insan ve hayvan hareketlerinden elektrik enerjisi elde etme çalışmasıdır. Bu çalışma bir micro-elektromekaniksel sistem (MEMS) uygulamasıdır. İnce kareplakalar şeklinde olan piezoelektrik malzemelerin kan basıncının etkisiyle enerji elde edileceğini gösteren çalışmadır.

Piezoelektrik malzemeler kullanılarak elektrik enerjisi elde etmede kullanılan sistemlerde üretilen enerjinin kullanılabilir hale getirilmesi ve depolenebilmesi de oldukça önemlidir. Bu bağlamda yapılan ilk çalışmalardan birisi Ottman ve arkadaşları(Ottman ve ark., 2002), tarafından yapılan uygulamada sinüsoidal gerilim önce bir doğrultucu ile doğrultulmuş, daha sonrasında giriş ve çıkış empedansların birbirine eşitlenmesi için devrede bir DC-DC dönüştürücü kullanılmış ve en sonunda da bu üretilen enerji bir bataryada depolanmıştır. Çalışmada DC-DC dönüştürücünün kullanılması sistemin enerji transferini %400 kadar artırılabilmiştir.

Gücün veya üretilen enerjinin depolaması ile ilgili yapılan diğer bir çalışmada 1996 yılında Starner tarafından gerçekleştirilmiştir (Starner, 1996). Çalışmada insan vücudunun hareketleri esnasında özellikle bacak ve parmak hareketlerinden piezoelektrik malzemeler kullanılarak elektrik enerjisi üretilebileceğini, ayrıca çalışmada kapasitör ve şarj edilebilir batarya kullanımının, tasarlanan devrenin uygunluğunu, avantajlarını ve dezavantajlarını da sıralamıştır.

Buraya kadar ki çalışma ve tasarımlarda hangi devre elemanlarının kullanılacağı, depolama elemanının kapasitör yada batarya olması gibi güç üretim konfigürasyonlarını en ideal şekilde optimize etmek ve güç-enerji depolama ünitelerinin geliştirilmesine yönelik çalışmalardır.

Piezoelektrik malzemeler kullanılarak maksimum seviyede enerji elde edilebilmesine yönelik devre topolojilerinin geliştirilmesi için araştırmacılar çok farklı çalışmalarda bulunmuşlardır. Ancak bu çalışma ve uygulamalarda güç-enerji üretim miktarı birçok elektronik sistemlerin çalıştırılabilmesi için yeterli seviyeye gelmemektedir.

2004 yılında Sodano ve ekibinin yaptığı bir çalışmada(Sodano ve ark., 2004), güç-enerji depolama metod ve yöntemlerindeki verim düşüklüğünün asıl nedeninin uygulamalarda ve tasarlanan devrelerde kapasitör kullanımı olduğunu belirtmiştir.

Geliştirdiği uygulamada piezoelektrik malzemeleri kullanarak, boşalmış bataryayı tekrar doldurabilmiştir. Bir batarya, makine tarafından üretilen titreşim enerjisi ile kısa bir sürede tekrar şarj edilebilmektedir. Ayrıca çalışmada, bulunan bu yeni yöntem ile geleneksel olarak kapasitöre enerji depolama yöntemiyle karşılaştırmış, batarya kullanımının, kondansatörün daha kısa deşarj süresi nedeniyle, elektronik malzemeler üzerindeki kullanılışlılığını kanıtlamıştır.

Piezoelektrik malzeme ile ilgili akademik ve endüstriyel çalışmalar zaman geçtikçe daha da artmaktadır. Farklı piezoelektrik malzeme yapılarının araştırılması, piezoelektrik malzemenin üretim aşamalarında çok farklı katkı maddelerinin değişik yöntemlerle bu malzemelerin elektrik üretme kapasitelerinin artırılması gibi yapısal özelliklerinin geliştirilmesine yönelik çalışmalar olduğu gibi mevcut hazırda bulunan piezoelektrik malzemeler kullanılarak elektrik enerji hasatının maksimum seviyeye getirilmesine yönelik çalışmalarda bulunmaktadır.

Bu çalışmalardan bazıları şunlardır:

Xuan-Dien ve arkadaşları yaptıkları çalışmada (Xuan-Dien ve ark., 2014), maksimum güç noktası izleme (MPPT) yöntemi kullanılarak bir piezoelektrik enerji toplama sisteminin optimizasyonunu önermektedir. Bu çalışmada AC-DC tam köprü doğrultucuya MPPT metodu uygulanmış ve sistem, düşürücü-yükseltici (buck-boost) DC-DC dönüştürücü üzerinden kontrol edilmiştir. MPPT ünitesini kullanarak, AC-DC doğrultucunun güç verimliliği, yük durumuna bakılmaksızın her zaman % 80'den büyük olarak ölçülmüştür. Simülasyon sonuçlarında ise sistemin toplam verimliliği % 64 olarak ölçülmüş ve 51 μ W güç elde edebildiğini göstermiştir.

Elliott ve Mitcheson yaptıkları çalışmada (Elliott ve Mitcheson, 2014), piezoelektrik enerji hasat sisteminin tam dalga doğrultucuda kullanılan diyotların iletim-kesim sürelerini ayarlayarak kondansatör geriliminin ayarlaması yapılmıştır. Böylece sistemin güç dalgalanmalarının önüne geçmek ve maksimum güç elde etmek için bir buck konvertör kontrol edilmiştir.

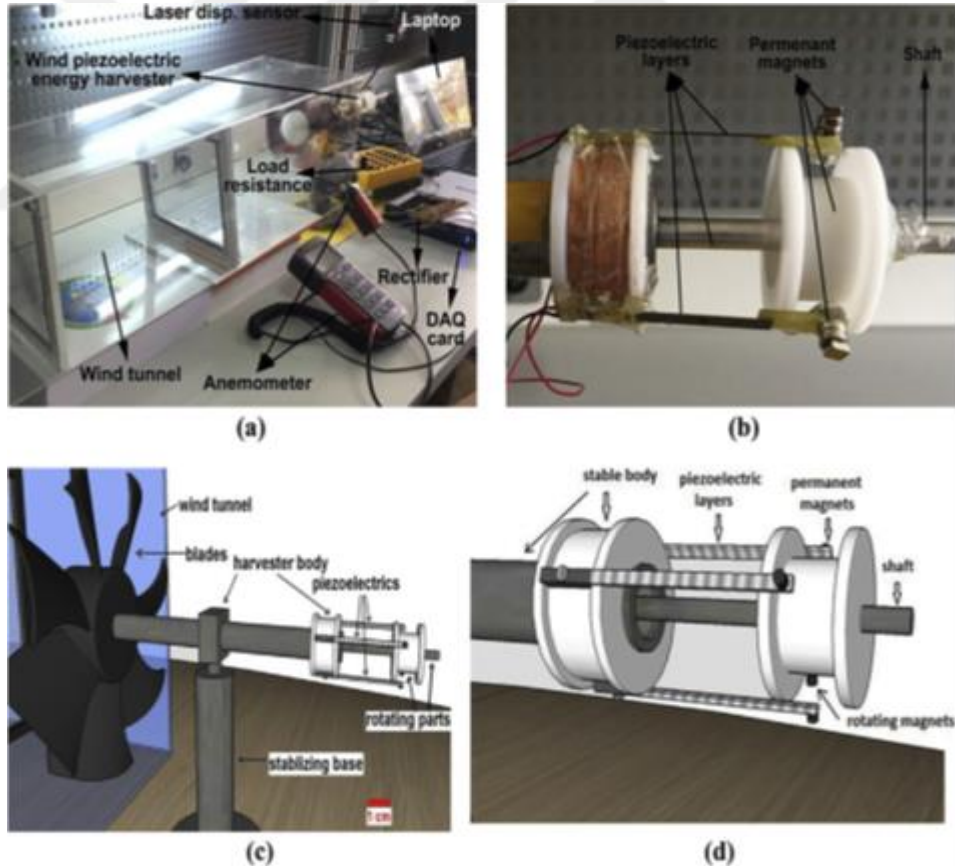
Chew ve Zhu yaptıkları çalışmada (Chew ve Zhu, 2018), piezoelektrik hasat sistemlerin çoğunda maksimum enerji transferi, açık devre gerilimin yarısında $V_{OC}/2$ gerçekleştiğinin varsayarak bunun içinde maksimum güç noktasını enerji toplayıcısına paralel olarak bağlanan ve özel olarak tasarlanan bir yüksek geçiren filtre yardımıyla bulmuşlardır. MPPT kontrol devresi, enerji toplayıcısının açık devre gerilimini bulmak zorunda kalmadan doğrudan bu gerilim yarısına ulaşma zamanını filtre yardımıyla doğrudan belirlediği için programlanabilir bir kontrolöre de ihtiyaç duymamaktadır. Bu durum sistemin düşük güç tüketimine neden olmaktadır. Çalışmada bir piezoelektrik enerji toplayıcısı (PEH), bir tam dalga köprü tipi doğrultucu ve bir DC-DC dönüştürücü beraber kullanılmıştır. Piezoelektrik enerji hasatçısı 2 ile 10 Hz arasındaki düşük frekanslarda çeşitli gerilme seviyelerine maruz bırakılarak MPPT yöntemi kullanılarak çalıştırılan sistem, $5.16 \mu W$ kadar düşük güç tüketimi ile % 98.28'e kadar verimliliğe sahiptir.

Kawai ve arkadaşları uyguladıkları çalışmada (Naoki Kawai ve ark., 2015), geleneksel yöntemlerle piezoelektrik elemanlardan elde edilen güç parazitik kapasitör üzerinde bir kayıp yaşamaktadır. Çalışmada önerilen yöntemle bu güç kaybı en aza indirilmeye çalışılmıştır. Bu sistem için açık devre gerilimi MPPT yöntemi kullanılarak sistemin güç kontrolü sağlanmıştır. MPPT gerilimi 2.92V-5V arasında üç farklı durum altında incelenmiştir. Ayrıca çalışma frekansı 100-200 kHz arasında ölçülmüştür. Balato ve arkadaşları yaptıkları çalışmada (Marco Balato ve ark., 2018), giriş titreşimlerinin özellikleri zamanla değiştiğinde rezonans piezoelektrik titreşim enerjisi toplayıcısının (RPVEH) optimum çalışma noktası da zamanla değişmektedir. Böyle bir optimum çalışma noktası, çıkarılan elektrik gücünün en yüksek değeri ile tanımlanır. Maksimum Güç Noktası (MPP) olarak adlandırılır. Bu makale RPVEH'ler için MPP İzleme (MPPT) tekniklerine odaklanmıştır. Bir DC / DC dönüştürücü tarafından basamaklanan köprü tipi doğrultucusunun kullanımına dayanan en yaygın RPVEHAC / DC mimarisinde, değiştir-gözlemlenilen MPPT yöntemi kullanılarak doğrultucunun çıkışındaki geriliminin (V_o) uygun şekilde ayarlanması sağlanmıştır. Sistemin gücü $560 \mu W$ olarak ölçülmüş olup çıkış gerilim 0.05 V ile 0.6V arasında değişim göstermiştir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

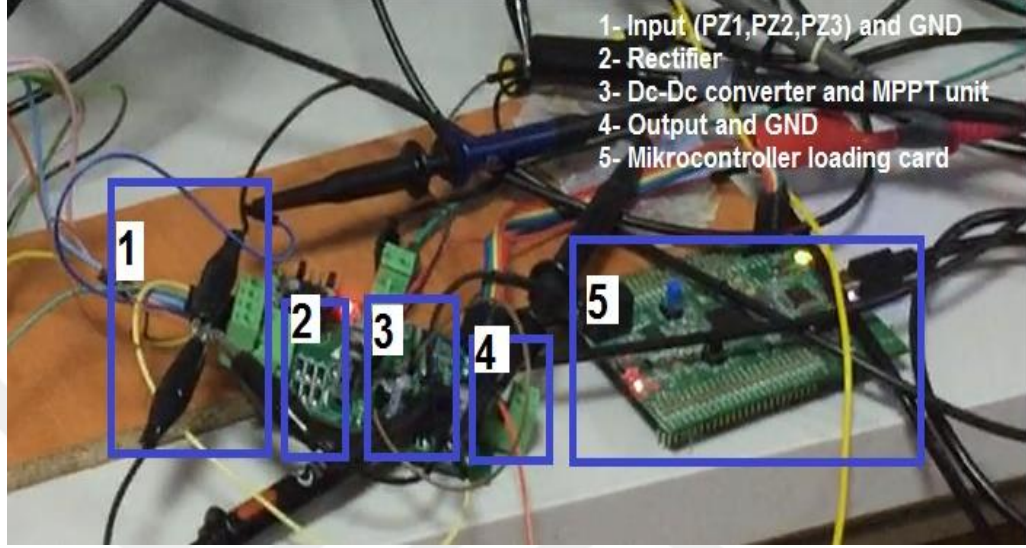
3.1. Materyal

Çalışmanın ana materyalini piezoelektrik malzeme temelli maksimum güç noktası izleme (MPPT) yöntemi ile piezoelektrik rüzgar enerji hasat sisteminin (PWEH) dizayn edilerek modellenmesi ve uygulanması oluşturmaktadır (Kurt ve ark., 2017). Piezoelektrik rüzgar enerji hasat sistemi ikianı kısımdan oluşmaktadır. Şekil 3.1.'de gösterilen ilk kısımda piezoelektrik enerji hasat sisteminin piezoelektrik levhaların rüzgar tüneli ve döner pervane düzeneği ile döndürülmesi sonucunda piezoelektrik levhalardan enerji elde edilmesi gösterilmiştir.



Şekil 3.1. (a) Önerilen rüzgâr enerji üretici ve test düzeneği, (b) piezoelektrik tabakalar ve mıknatıslar, (c),(d) enerji üreteceği sistemindöner parçaların kapalı görünümüleri

Şekil 3.2.'de gösterilen ikinci kısımda ise tasarlanan (PWEH) sisteminden maksimum güç (MPPT) elde etmek için tasarlanan ve uygulanan devre düzeneği görülmektedir.



Şekil 3.2. Piezoelektrik rüzgâr enerji hasat sistemden maksimum güç elde etmek için tasarlanan ve uygulanan gerçek devre düzeneği

3.1.1. Tasarlanan piezoelektrik rüzgâr enerji hasat (PWEH) sistemi

Son zamanlarda insansız hava araçları, kablosuz sensör noktaları, kalp pilleri gibi uzun ömürlü enerji ihtiyacı olan cihazlara yönelik birincil enerji kaynağı pillere alternatif olabilecek enerji kaynakları ile ilgili artan sayıda çalışma vardır (Hosseinabadi ve ark., 2015); (Karami ve Inman, 2012). Nanoteknolojideki son gelişmelerden sonra, piezoelektrik malzeme ve ilgili yapılar üzerine birçok uygulama mikrodan makro ölçeklere kadar değişik geometrilere üretilmektedirler (Radousky ve Liang 2012); (Harne ve Wang, 2013); (Radousky ve Liang, 2012). Bu çerçevede, bisiklet, ayakkabı kol ve bacak bağlantılı piezo güç sistemler gibi makro yapılar veya cihazlar da mikro yapılara ek olarak son zamanlarda çalışılmıştır (Minazara ve ark., 2008). Günümüzde, literatürde birçok enerji hasat sistemi uygulaması vardır (Cevik ve ark., 2011). Enerji üretmede kullanılan yaprak tipi piezoelektrik jeneratörler (Lipson, 2009), temaslı yel değirmenleri (Priya ve ark., 2005); (Myers ve ark., 2007), rüzgâr tipi jeneratörler (Bryant ve Garcia, 2011) ve

kendiliğinden uyarılan rüzgar enerji generatörlerinden(Yun ve ark., 2009) bahsedilebilir. Bu sistemlerin birçoğu mekanik olarak temas eden piezoelektrik katmanlarla çalıştırılır(Lake ve ark., 2011).

En kompakt yapıya sahip olan enerji hasat sistemleri olarak kullanılan piezoelektrik malzemeler kablosuz cihazlarda, endüstriyel çalışmalarda ve çeşitli insan faaliyetlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır(Fu ve Yeatman, 2015); (Uzun ve Kurt, 2013). Temel olarak kolay kurulum ve bakımları, kompakt yapıları ve yüksek enerji yoğunluğundan dolayı bu uygulamalar son yıllardaki çalışma konusudurlar(Song ve ark., 2016). Son teknolojik gelişmelere göre de, bu çalışmalar geçmiş yıllara göre çok daha ucuz hale gelmişlerdir. Bu nedenle, piezoelektrik bileşenli enerji uygulamaları, güneş panelleri, termoelektrik generatörleri gibi diğer enerji dönüşüm sistemleri arasında iyi bir yer bulmaya başlamışlardır.

Düşük enerji gereksinimlerini göz önünde bulundurarak, piezoelektrik enerji hasat sistemleri, birçok mühendislik uygulaması için yeterli olan μW ve mW 'lık bir aralıkta güç verebilirler. Bir yandan, elektrikli cihazların çoğunda pil veya batarya kullanılması birçok çevresel sorunları veya karmaşık geri dönüşüm süreçlerini beraberinde getirdikleri nedeniyle birtakım bakım problemleri yaratırlar.Ayrıca, bir pilin veya bataryanın ömrü çok sınırlıdır.

Kullanım ömrü az olan bu pillere farklı harici ve çevre dostu enerji kaynaklar ile çalışan sistemleri monte ederek kullanmak bu pillerin ömürlerini daha da arttırabilir(Friswella ve ark., 2010); (Adhikari ve ark., 2009).Bu bağlamda, pilleri gerçek zamanlı olarak şarj etmek veya cihazın kendisini sürekli besleyecek ek bir piezoelektrik enerji hasat sistemi monte edilerek çalışması sağlanabilir.

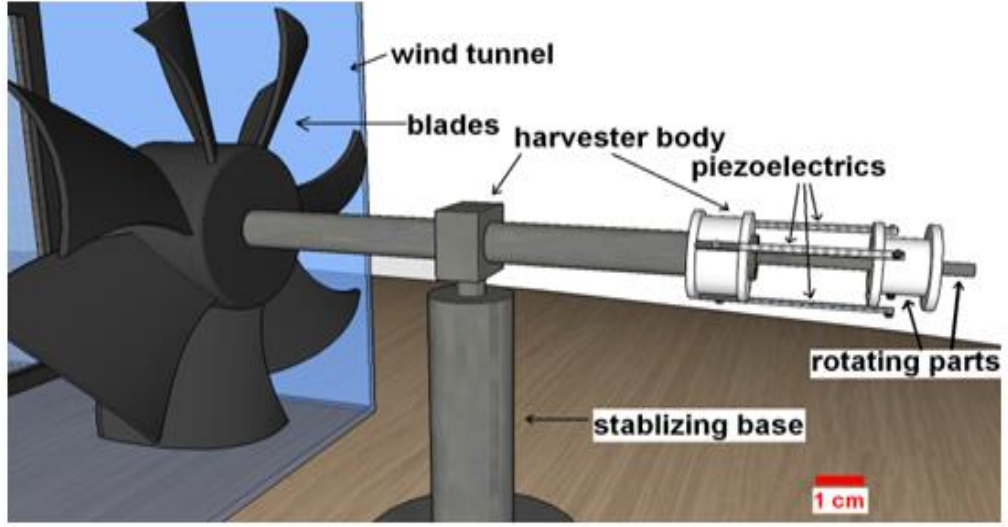
Piezoelektrik enerji hasat sistemleri ortamda bulunan titreşimleri faydalı bir elektrik enerjisine dönüştürebilen devre ve cihazlardır. Enerji hasat sistemlerinin performansını arttırmayı amaçlayan temel araştırma faaliyetleri aşağıdaki gibi üç ana grupta toplanır.

- Piezoelektrik malzemelerin üretimi
- Mekanik sistemlerin tasarımı ve uygulaması
- Verimi yüksek enerji dönüşüm devreleri

Her ne kadar bir piezoelektrik malzeme bileşenli uygulamadan elde edilen enerji yoğunluğu, geleneksel güneş ve rüzgar enerjisi uygulamalarından daha yüksek olsa da, piezo sistemler bazı sorunlara sahiptir ve daha iyi enerji çözümleri için daha da geliştirilmeleri gerekmektedir.

Bu piezoelektrik rüzgâr enerji hasat (PWEH) sisteminin temel amacı, mevcut karmaşık gerilim dalga formlarından maksimum seviyede faydalı elektrik enerjisi üretimini göstermek ve çeşitli rüzgar hızları için dirençli bir yük ile maksimum çıkış gücünü karakterize etmektir. Ek olarak, üç piezoelektrik katmana sahip olan bu yeni tasarlanan ve uygulanan enerji hasat sistemi mekanik temassız bir mikro-seri güç üretimi için tasarlanmıştır. Uygulaması yapılarak önerilen hasat sistemi, elektrik şebekesinden uzak olan ve düşük güçlü uygulamalar için herhangi bir yerde kullanılabilir. Sistem düşük rüzgar hızlarında beslenebilir ve batarya yada pilin ömrünün uzatılmasına yardımcı olabilir. Ayrıca, aynı piezoelektrik rüzgar enerji hasat (PWEH) sistemi daha kalın piezoelektrik tabakalar kullanılarak enerji aralığı daha da arttırılabilir.

Tasarlanan piezoelektrik rüzgâr enerji hasat (PWEH) sistemi dört ana bölümden oluşur. Şekil 3.1.(a-d)'de rüzgârla serbestçe dönebilen bir pervane, mekanik rotasyonu miknatısa aktaran bir döner shaft, üç tabaka içeren bir piezoelektrik ünitesi ve piezoelektrik tabakaların terminallerinden elde edilen elektrik sinyalini düzelten ve depolayarak saklamaktan sorumlu olan elektronik bir devreden oluşmaktadır. Tasarlanan ve deneysel ölçümleri yapılan piezoelektrik rüzgar enerji hasat sistemi (PWEH) tasarımı Şekil 3.3.'te gösterilmiştir.

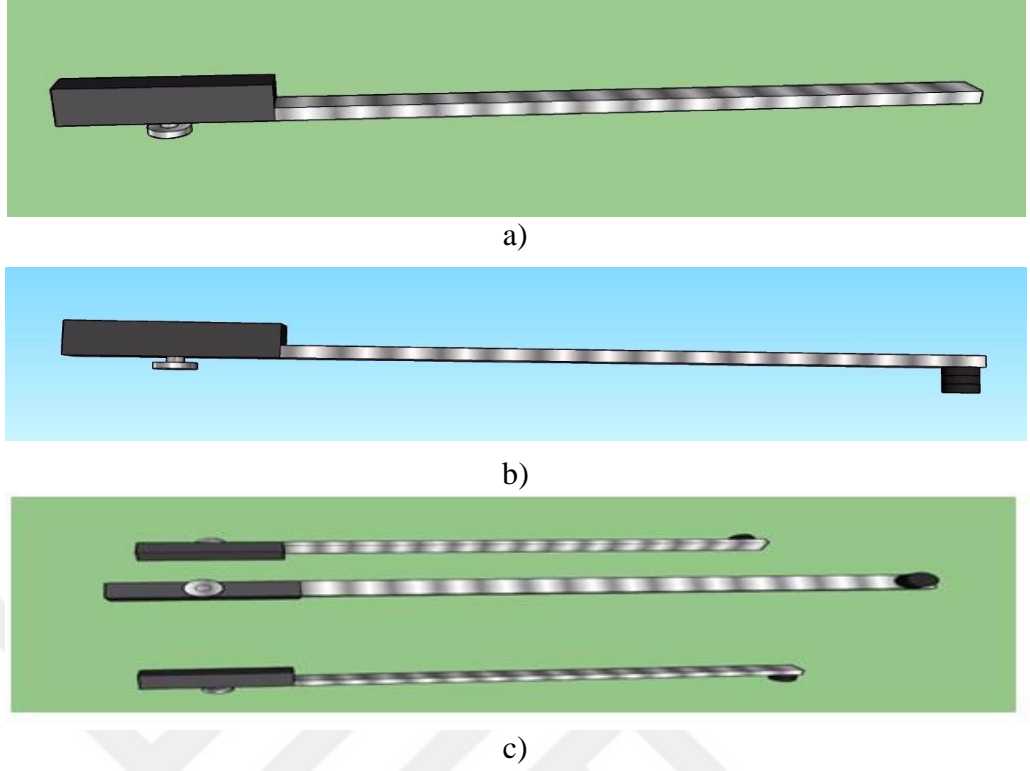


Şekil 3.3. Piezoelektrik rüzgâr enerji hasat (PWEH) sistemi

Serbest dönen bir pervane, mekanik dönüşü kasnağın arkasındaki piezoelektrik levhalara ve merkezi mıknatısın bulunduğu kısma aktaran bir şaft yardımı ile piezoelektrik malzemelerin mıknatıs yardımı ile titreştirilmeleri ile uçlarından gerilim elde edilmesi mantığına dayanır.

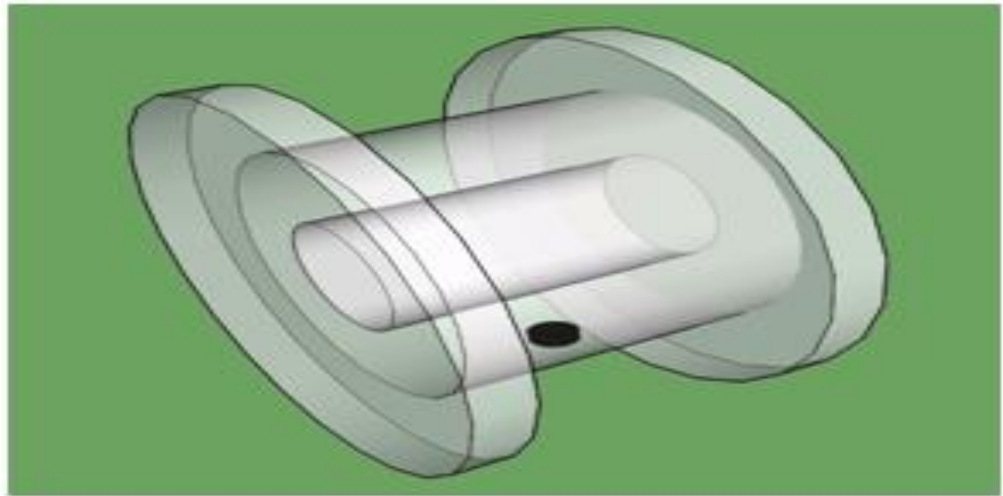
Piezoelektrik rüzgâr enerji hasat (PWEH) sisteminin üç levhalı yapısı, dairesel bir geometri üzerinde birbirine 120 derecelik açıyla yerleştirilmiş üç ayrı piezoelektrik levhadan oluşur. Küçük bir kalıcı mıknatıs şaft üzerinde sabitlenmiş olacak şekilde piezoelektrik levhaların her birisinin ucuna yerleştirilen diğer mıknatısın tersi yönde iteceği şekilde yerleştirilerek dizayn edilmiştir. Cihaz üç tane aynı piezoelektrik levhaya sahip olsa da, uçlarındaki mıknatıs sayıları farklıdır. Bu mıknatısların farklı kütlelerinden dolayı levhaların doğal frekansı da farklı olur. Piezoelektrik levhaların güvenliğini sağlamak için silindirik polietilen malzeme şaft üzerine sabitlenmiştir.

Şekil 3.4.'te kullanılan üç piezoelektrik levha, milin merkezinden aynı radyan mesafedeki dairesel bir geometri üzerinde sırasıyla 120 derecelik bir açıda olacak şekilde yerleştirilir. Her bir piezoelektrik levhanın ucuna, 1 cm çapında ve 5 mm kalınlığında silindirik farklı sayıda kalıcı mıknatıslar yerleştirilmiştir.



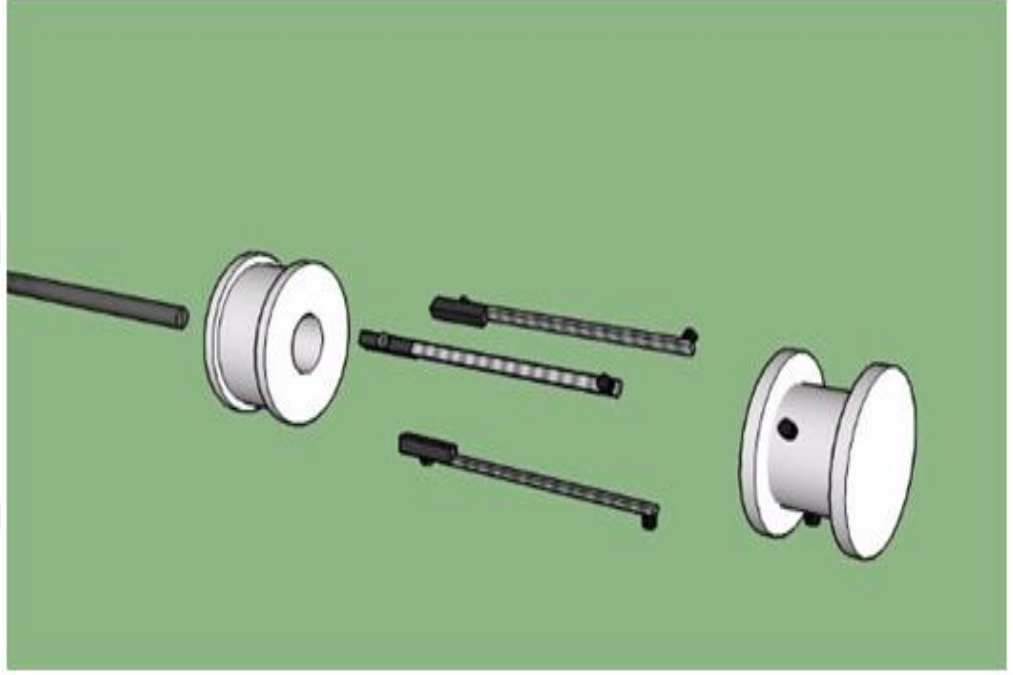
Şekil 3.4. (a) Piezoelektrik levha (b) piezoelektrik levhalara yapıştırılan mıknatıslar (c) Bu piezoelektrik levhalar ve mıknatısların görünümü

Şekil 3.5.'te kasnağın arkasındaki şaft üzerinde yerleştirilmiş bulunan sabitlenmiş bir mıknatıs bulunmaktadır. Bu mıknatıs piezoelektrik katmanların uçlarında bulunan mıknatıslarla aynı kutupta bulunur.



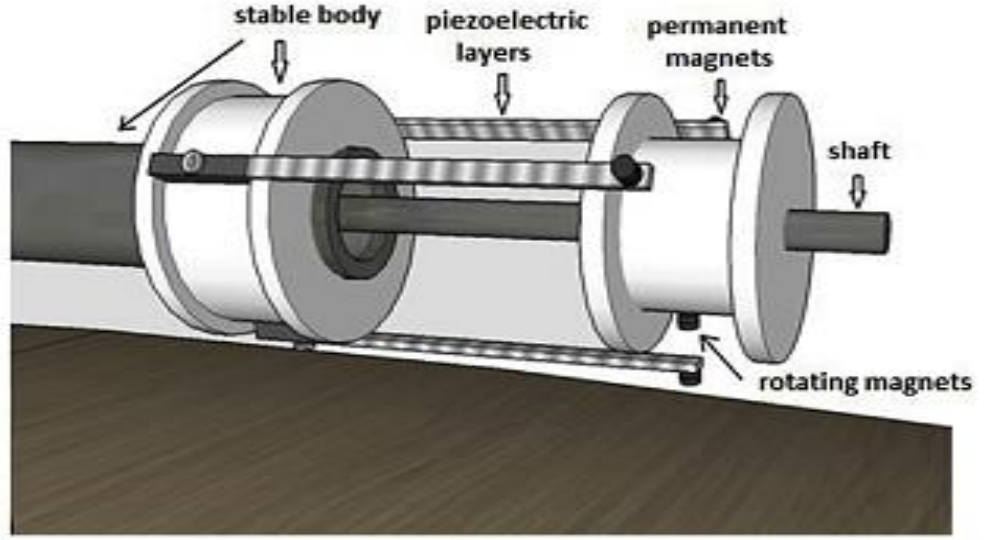
Şekil 3.5. Sistemde gömülü olan sabit mıknatıs görünümü

Şekil 3.6.'da piezoelektrik levhalar ve mıknatısların döner şaft etrafında yerleştirilmesi gösterilmiştir. Böylece, şaftın üzerindeki sabit mıknatıs piezoelektrik malzemede bulunan mıknatısa yaklaştığında itilirler. Bu durum dönme ile her piezoelektrik levhayı sırasıyla titreştirir. Piezoelektrik levhaların ucundaki mıknatıs sayıları farklıdır. Bu nedenle piezoelektrik levhaların doğal frekansları mıknatıs kütlesi nedeniyle değişir.



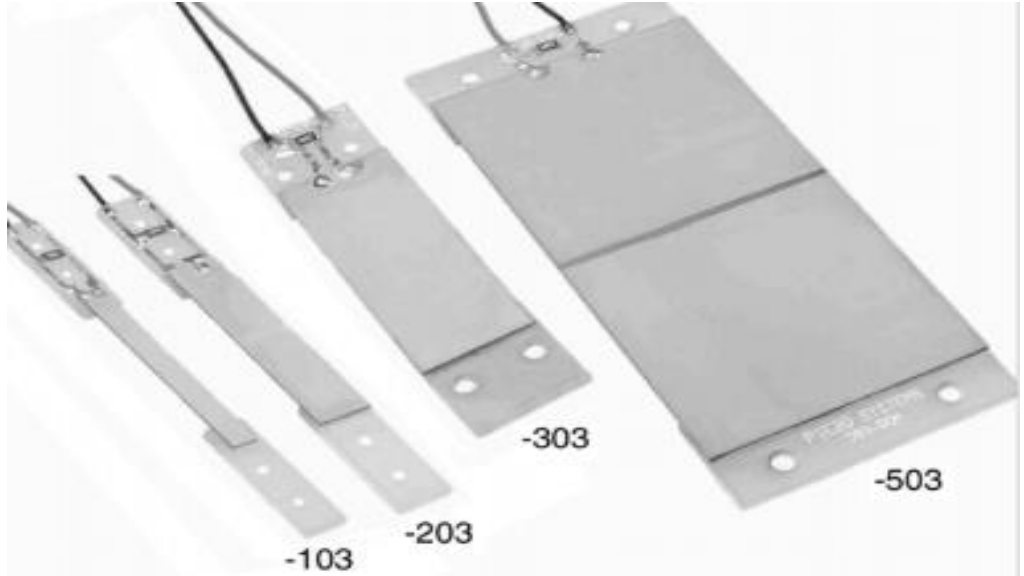
Şekil 3.6. Piezoelektrik levhalar ve mıknatısların döner şaft etrafında yerleştirilmesi

Şekil 3.7.'de dönen parçaların kapalı görünümü gösterilmiştir. Dönme hareketi sırasında piezoelektrik malzemelerin güvenliğini sağlamak için, şaftın üzerine silindirik bir polietilen malzeme konularak temasın önüne geçilmiştir. Bu durum piezoelektrik levhaların özellikle yüksek rüzgar hızlarında hasar görmesini önlemek içindir.



Şekil 3.7. Dönen parçaların kapalı görünümü

Bu piezoelektrik rüzgâr enerjisi hasat sistemi şafta temassız çalışma yapıya sahip yeni bir sistemdir. Deneysel çalışmalara göre de, optimum güç üretimi, yüksek harmonik dalga formlarına sahip olan bu sistem için önemli bir durumdur. Bu çalışma kapsamında, uygun bir doğrultucu ve depolama devresi bulmak gerekir. Deney ve benzetimde kullanılan piezoelektrik malzemelerin görünüşleri Şekil 3.8.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Deneylerde ve benzetimlerde kullanılan piezoelektrik malzemeler ve özellikleri

Ayrıca kullanılan piezoelektrik malzemelerin ürün özellikleri ve bazı referans değerleri Çizelge 3.1.'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. Deney ve benzetimde kullanılan piezoelektrik malzemeler

Piezo Malzeme	Ağırlık (Gram)	Sertlik (N/m)	Kapasitans (nF)	Anma Gerilimi (V)	Rezonans Frekansı (Hz)
1- PZT-103	0.9	190	12	++90	275
2- PZT-203	1.4	380	26	++90	275
3- PZT-303	2.3	760	52	++90	275
4- PZT-503	9.5	245	260	++90	68

Tasarlanan piezoelektrik rüzgâr enerji hasat (PWEH) sisteminde piezoelektrik levhaların 120 derecelik açı ile konumlandırılması, kullanılan rüzgâr tüneli, sistemin hareketlenmesi ve piezoelektrik malzemelerin dönme ile titreşmesi, levhaların daha fazla bükülmesinin sağlanması için mıknatısların yerleştirilmesi, rüzgâr hızının ayarlanması için kullanılan Anemometre, sistemin konumunu belirlemede kullanılan lazer sensör, yük dirençleri, doğrultma işlemi için kullanılan üç fazlı doğrultmaç-depolama devresi ve çıkış sinyallerini görmekte kullanılan osiloskop ve dizüstü bilgisayardaha önce Şekil 3.1.'de gösterilmiştir.

3.1.2. Piezoelektrik rüzgâr enerji hasat (PWEH) sisteminin teorik ifadesi

Önerilen ve deneysel olarak tasarımı yapılan piezoelektrik rüzgar enerji hasat (PWEH) sisteminin teorik ifadesi aşağıda belirtildiği gibi olur.

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega, \quad (3.1)$$

$$m_1 \frac{d^2 r_1}{dt^2} = -kr_1 - \gamma \frac{dr_1}{dt} + \alpha v_1 + f_m \delta(\theta - \theta_1), \quad (3.2)$$

$$m_2 \frac{d^2 r_2}{dt^2} = -kr_2 - \gamma \frac{dr_2}{dt} + \alpha v_2 + f_m \delta(\theta - \theta_2), \quad (3.3)$$

$$m_3 \frac{d^2 r_3}{dt^2} = -kr_3 - \gamma \frac{dr_3}{dt} + \alpha v_3 + f_m \delta(\theta - \theta_3), \quad (3.4)$$

$$I_1 = \alpha \frac{dr_1}{dt} - C \frac{dv_1}{dt}, \quad (3.5)$$

$$I_2 = \alpha \frac{dr_2}{dt} - C \frac{dv_2}{dt}, \quad (3.6)$$

$$I_3 = \alpha \frac{dr_3}{dt} - C \frac{dv_3}{dt}, \quad (3.7)$$

Burada; θ , ω , δ , m , r , u, α , V , f_m , θ_A , C , I ve k sırasıyla, mıknatısın açısal konumu, pervane hızı, $\theta = \theta_i$ ($i = 1 \dots 3$) için 1 değerini değilse 0 veren Kronecker deltası, katmanın kütlesi, milin merkezine radyal konum, katmanın kütle yer değiştirmesi, katmanın kuvvet faktörü, katman terminalleri arası gerilim, mıknatısın manyetik kuvveti, katmanın açısal konumu, katmanın kapasitansı, katmanın ürettiği akımı ve etkileşim sabitini ifade eder.

Boyutsuz formu göstermek için, zaman sabiti $\tau = \omega_0 t$, türevlerini denklem (1-7)'ye kadar alarak aşağıdaki gibi ifade edebiliriz.

$$\frac{d\theta}{d\tau} = \frac{\omega}{\omega_0}, \quad (3.8)$$

$$\frac{d^2 r_1}{d\tau^2} = -r_1 \left(1 + \frac{f_{11} \delta(\theta - \theta_1)}{k} \right) - \Gamma_1 \frac{dr_1}{d\tau} - A_1 v_1 + F_{01} \delta(\theta - \theta_1), \quad (3.9)$$

$$\frac{d^2 r_2}{d\tau^2} = -r_2 \left(\frac{m_1}{m_2} + \frac{m_1}{m_2} \frac{f_{12} \delta(\theta - \theta_2)}{k} \right) - \Gamma_2 \frac{dr_2}{d\tau} - A_2 v_2 + F_{02} \delta(\theta - \theta_2), \quad (3.10)$$

$$\frac{d^2 r_3}{d\tau^2} = -r_3 \left(\frac{m_1}{m_3} + \frac{m_1}{m_3} \frac{f_{13} \delta(\theta - \theta_3)}{k} \right) - \Gamma_3 \frac{dr_3}{d\tau} - A_3 v_3 + F_{03} \delta(\theta - \theta_3), \quad (3.11)$$

$$I_1 = \alpha \omega_0 \frac{dr_1}{d\tau} - C \omega_0 \frac{dv_1}{d\tau}, \quad (3.12)$$

$$I_2 = \alpha \omega_0 \frac{dr_2}{d\tau} - C \omega_0 \frac{dv_2}{d\tau}, \quad (3.13)$$

$$I_3 = \alpha \omega_0 \frac{dr_3}{d\tau} - C \omega_0 \frac{dv_3}{d\tau}, \quad (3.14)$$

Burada, $f_{mi} = \sin(\theta)(f_{0i} + (d-r_i) f_{1i})$, önceki çalışmamızda yer alan dönme etkisine sahip manyetik alana göre düşünülmüştür (Tabesh ve Fréchette, 2010).

Burda önceden bahsedilen piezoelektrik indeksini tanımlar. Manyetik kuvvet r konumuna göre en az lineer bağımlı yer değiştirme fonksiyonudur. řu anda ki çalışmamızın amacında, yüksek derece manyetik kuvvet f_m kayda alınmamıştır. Fakat, d mesafesi sabit şaftın üzerine yerleştirilen mıknatısların bir ucundan diğer ucuna olan mesafedir. f_0 ve f_l buna göre formlanmıştır. Sistem parametleri boyutsuz forma göre aşağıda ki gibi düzenlenmiştir:

(a) Manyetik kuvvet mukavemeti:

$$F_{01} = \left(\frac{f_0 + d f_1}{k} \right), \quad (3.15)$$

$$F_{02} = \left(\frac{f_{02} + d f_{12}}{m_2 \omega_0^2} \right), \quad (3.16)$$

$$F_{03} = \left(\frac{f_{03} + d f_{13}}{m_3 \omega_0^2} \right), \quad (3.17)$$

(b) Sönümlenme katsayısı:

$$\Gamma_1 = \frac{\gamma}{k} \quad (3.18)$$

$$\Gamma_2 = \frac{\gamma}{m_2 \omega_0} \quad (3.19)$$

$$\Gamma_3 = \frac{\gamma}{m_3 \omega_0} \quad (3.20)$$

(c) Kuvvet Faktörleri:

$$A_1 = \frac{\alpha}{k} \quad (3.21)$$

$$A_2 = \frac{\alpha m_1}{m_2 k} \quad (3.22)$$

$$A_3 = \frac{\alpha m_1}{m_3 k} \quad (3.23)$$

(d) Her bir piezoelektriğin doğal açısal frekansı:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m_1}} \quad (3.24)$$

Yukarıda ki formülleri yorumlayınca, Runge-Kutta zaman integrasyonunu MatLab'ta uygulanınca ilk hareket, hız, üretilen akım ve gerilim matematiksel olarak modellenmiştir. Bu amaçla, ikinci derece diferansiyel denklemler birinci dereceye düşürülmüştür. Piezoelektrik katmanların hız şartlarını u olarak tanımlayınca, aşağıda ki denklemler oluşmuştur.

$$\frac{d\theta}{d\tau} = \frac{\omega}{\omega_0}, \quad (3.25)$$

$$\frac{dr_1}{d\tau} = u_1 \quad (3.26)$$

$$\frac{du_1}{d\tau} = -r_1 \left(1 + \frac{f_{11} \delta(\theta - \theta_1)}{k} \right) - \Gamma_1 u_1 - A_1 v_1 + F_{01} \delta(\theta - \theta_1), \quad (3.27)$$

$$\frac{dr_2}{d\tau} = u_2 \quad (3.28)$$

$$\frac{du_2}{d\tau} = -r_2 \left(\frac{m_1}{m_2} + \frac{m_1}{m_2} \frac{f_{12} \delta(\theta - \theta_2)}{k} \right) - \Gamma_2 u_2 - A_2 v_2 + F_{02} \delta(\theta - \theta_2), \quad (3.29)$$

$$\frac{dr_3}{d\tau} = u_3 \quad (3.30)$$

$$\frac{du_3}{d\tau} = -r_3 \left(\frac{m_1}{m_3} + \frac{m_1}{m_3} \frac{f_{13} \delta(\theta - \theta_3)}{k} \right) - \Gamma_3 u_3 - A_3 v_3 + F_{03} \delta(\theta - \theta_3), \quad (3.31)$$

$$I_1 = \alpha \omega_0 \frac{dr_1}{d\tau} - C \omega_0 \frac{dv_1}{d\tau}, \quad (3.32)$$

$$I_2 = \alpha \omega_0 \frac{dr_2}{d\tau} - C \omega_0 \frac{dv_2}{d\tau}, \quad (3.33)$$

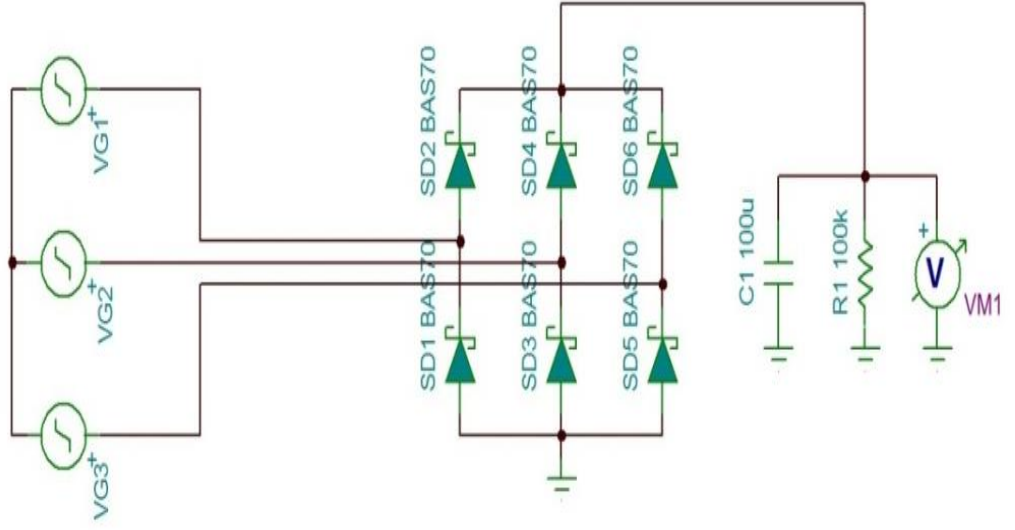
$$I_3 = \alpha\omega_0 \frac{dr_3}{d\tau} - C\omega_0 \frac{dv_3}{d\tau}, \quad (3.34)$$

Ne zaman ki elektriksel yük her bir piezoelektriğe bağlanınca, I akımı v/R_L olarak her zamanki gibi tanımlanır. Üretilen gerilim v , daha öncede tanımlanmıştır. Birinci derece diferansiyel denklemler MatLab'da tanımlanarak, gelecek bölümde örneklendirilmiş benzetim olarak sunulacaktır. Burada ise rüzgar hızı, açısız hız u olarak tanımlanmıştır. Bu formüllere göre, açısız hız ω ile pervane dönünce, mekaniksel etki radyal konum r ilgili katmana aktarılarak 1,2 ve 3 alt indisi ile tanımlanmıştır.

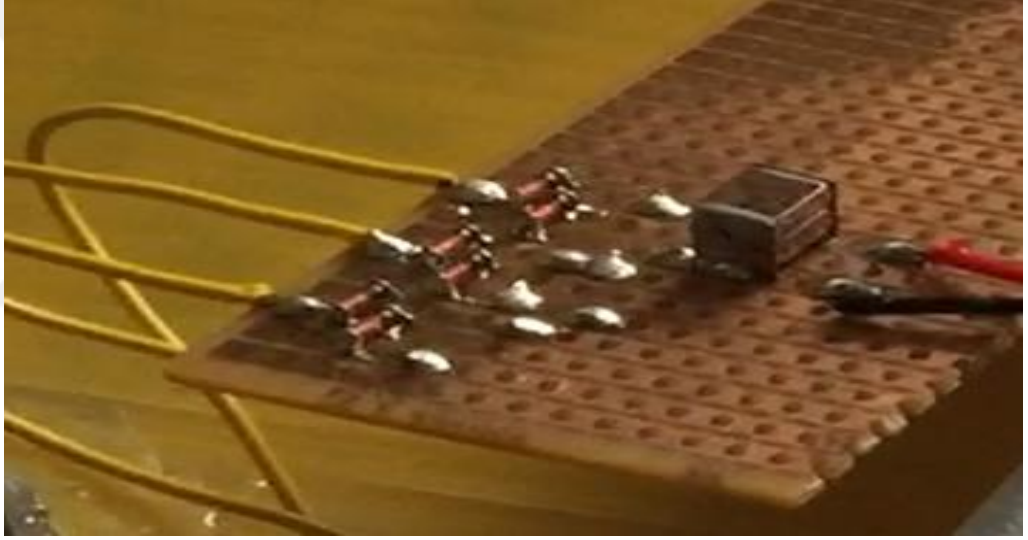
Çeşitli m_1 , m_2 ve m_3 ağırlıklarının doğal frekansla bükülen katmanlara etkileri ile üretilen dalga formları değiştirilmiştir. Denklem (Moheimani ve Fleming, 2006); (Ortiz ve ark., 2013) tanımlanan, piezoelektrik katmanın ürettiği akımları, radyal uzaklıklar bükülme ile değişir. Burada elektriksel akım, hız ve zamana bağlı potansiyel değişime bağlıdır. Burada, potansiyel değişim, piezo-malzemedeki değişen şarj miktarıdır (Kurt ve ark., 2017).

3.1.3. Piezoelektrik rüzgâr enerji hasat (PWEH) sisteminden enerji elde edilmesi

Şekil 3.9.'da doğrultucu ve depolama ünitesisematik gösterimi devresi gösterilmiştir. Üç piezoelektrik tabakanın terminallerinden elde edilen dalga formları, üç fazlı bir tam köprü doğrultucunun girişine verilir. Burada en iyi performans için düşük Shottky BAS70 tipi diyotlar kullanılmıştır. Doğrultucu çıkışından, doğrultulan dalga formu $100 \mu F$ 'ye eşit C1 kapasitörüne verilmiştir. Ayrıca, hasat sisteminin performansını gözlemlemek için devrenin çıkışına farklı dirençli yükler ekleyerek devre farklı çıkış yüklerinde denenmiştir. Piezoelektrik hasat sisteminin farklı yük koşullarında performansını değerlendirmek için doğrultucudan sonra $100 k\Omega$ 'luk bir direnç yerleştirilmiştir.



a)



b)

Şekil 3.9. Tasarlanan devrenin doğrultucu ve depolama ünitesi

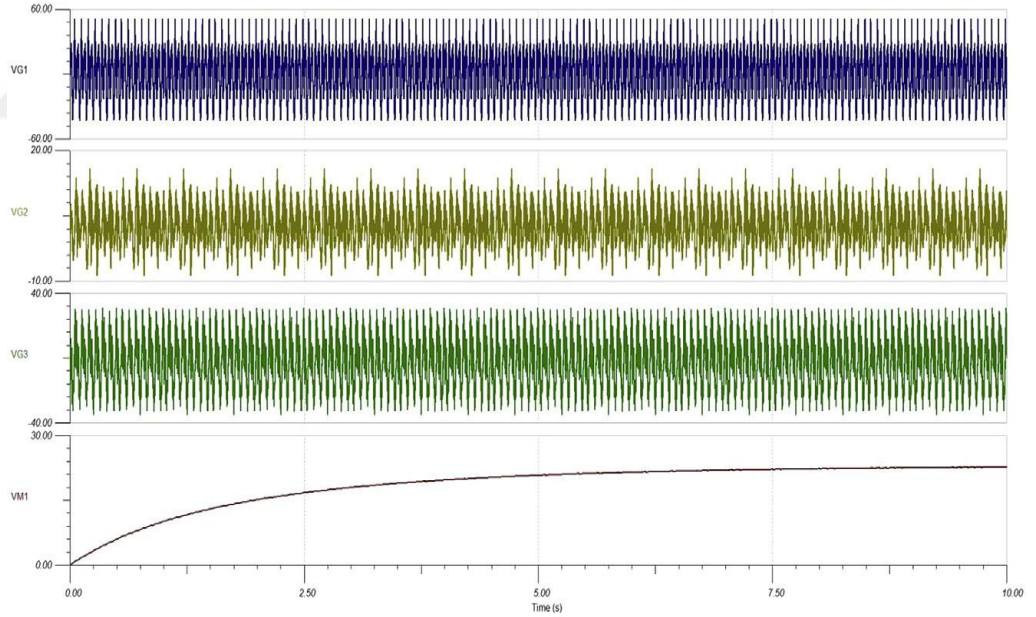
Deneyler Şekil 3.9.'da görülebileceği gibi, üç piezoelektrik levhadan alınan sinyallerin her birini temsil etmek için benzetimde üç gerilim generatörü yerleştirilmiştir.

Benzetimde kullanılan generatör modeli, gerilim dalga formunun (WAV formatında bir zaman serisi ile tanımlanmıştır. WAV zaman serileri ve en yüksek genlikler piezoelektrik rüzgâr enerji hasat sisteminin gerçek ölçümlerinden elde edilmiştir.

Piezoelektrik enerji hasat sistemlerinden maksimum güç noktası, açık devre geriliminin V_{OC} yarısında bulunan çalışma noktasında ve bu değere karşılık gelen kapalı devre akımının I_{cc} 'e eşit olduğu akım değerinde elde edilir. Bu dikkate alındığında ve denklem (3.1) ifadesi göz önünde bulundurulsa tasarladığımız hasat sistemi için kullanılan piezoelektrik elemanların optimum yüke eşit olan piezoelektrik enerji toplayıcısının iç empedansı, piezoelektrik elemanın veri sayfası parametrelerinden(Datasheet, 2016)(piezo sistemleri model D220-A4-203YB) elde edilebilir.

$$R_{opt} = \frac{V_{oc}}{I_{cc}} \cong 8.5k\Omega \leftrightarrow P_{max} = \frac{1}{4} \frac{V_{oc}^2}{R_{opt}} \quad (3.1)$$

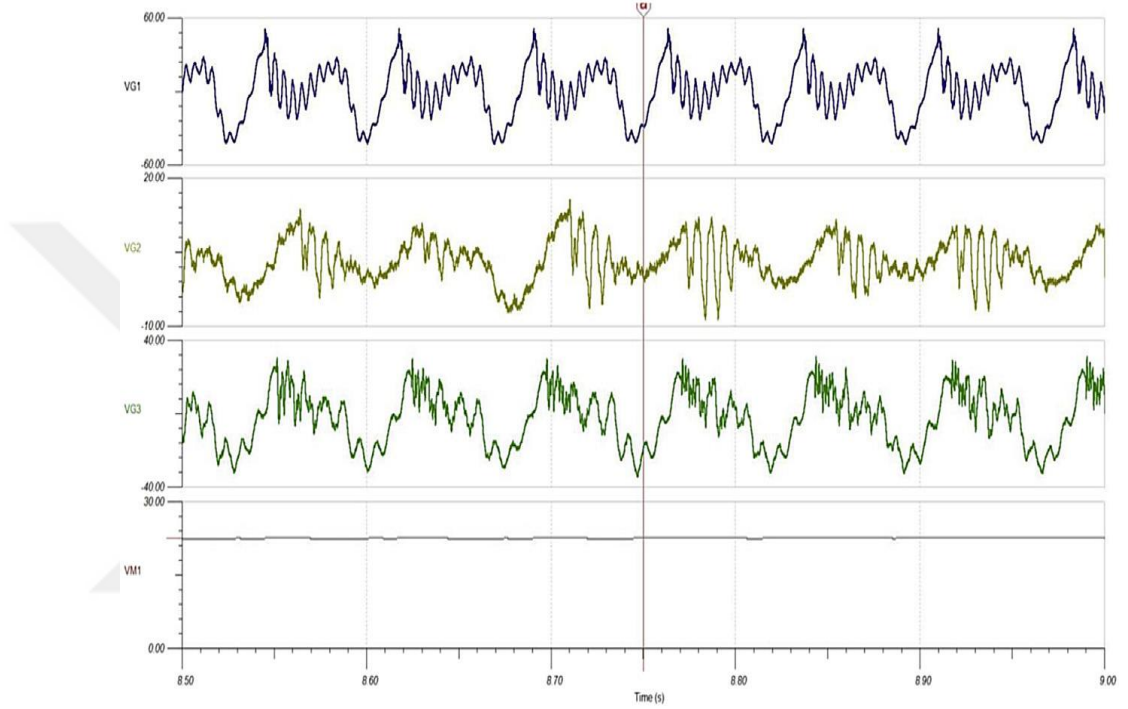
Tasarlanan piezoelektrik rüzgar enerji hasat sistemi için bu değer göz önüne alındığında, elde edilen grafik sonuçları Şekil 3.10.'da gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Üç adet piezoelektrik enerji toplayıcı ile 100 μ F kapasitör şarjının grafiği PZT-303 malzeme kullanılıştır

Piezoelektrik malzemeler dielektrik özelliklerinden dolayı çoğunlukla kapasitif bir ortam sergilediğinden, Şekil 3.10.'da görüldüğü gibi üç piezoelektrik levhanın enerji depolama özelliğinin iyi bir seviyede olduğunu söyleyebiliriz.

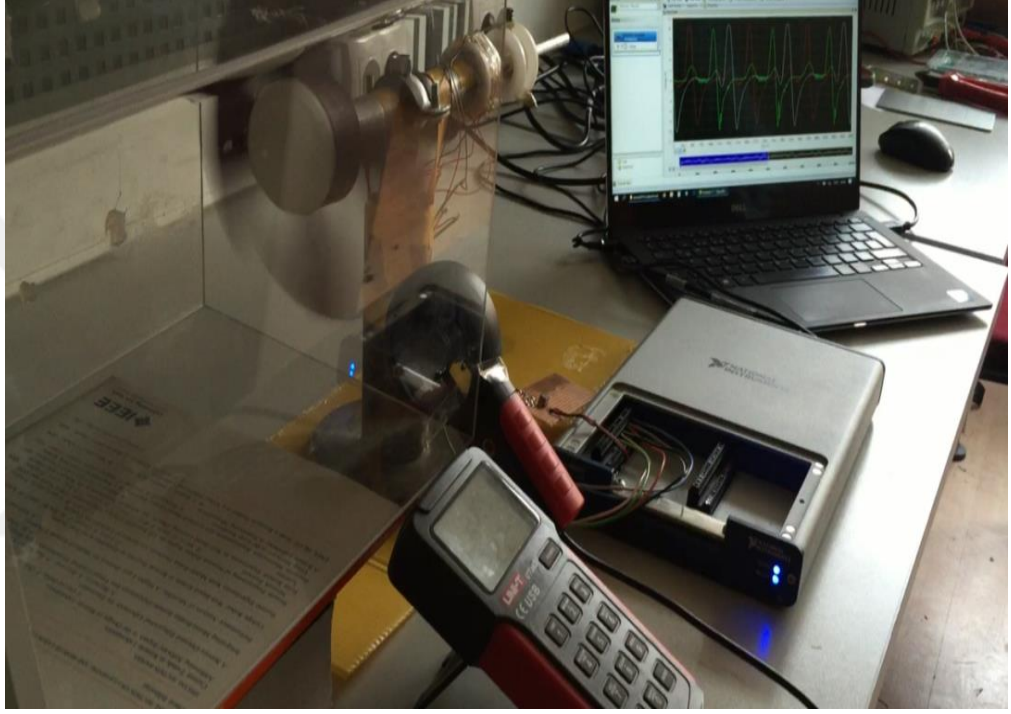
Şekil 3.9.'daki devrede kullanılan köprü tipi tam dalga doğrultucu devrenin kondansatörü şarj etmek için dalga formlarını düzeltmek için kullanıldığına dikkat etmemiz gerekmektedir. Görülebileceği gibi, doğrultmaç devresine bağlı 100 k Ω 'luk bir yük olduğunda bile, kondansatör üzerindeki gerilim yaklaşık 8 saniyede 22 V'a yakın bir değere ulaşır. Şekil 3.11.'de bu durum daha iyi görülmektedir.



Şekil 3.11.100 μ F kapasitörün üç adet piezoelektrik enerji toplayıcı ile şarj edilmesinin benzetim detayı: a işaretindeki konumda gerilim 22.4 V'a eşittir. PZT-303 malzeme kullanılmıştır

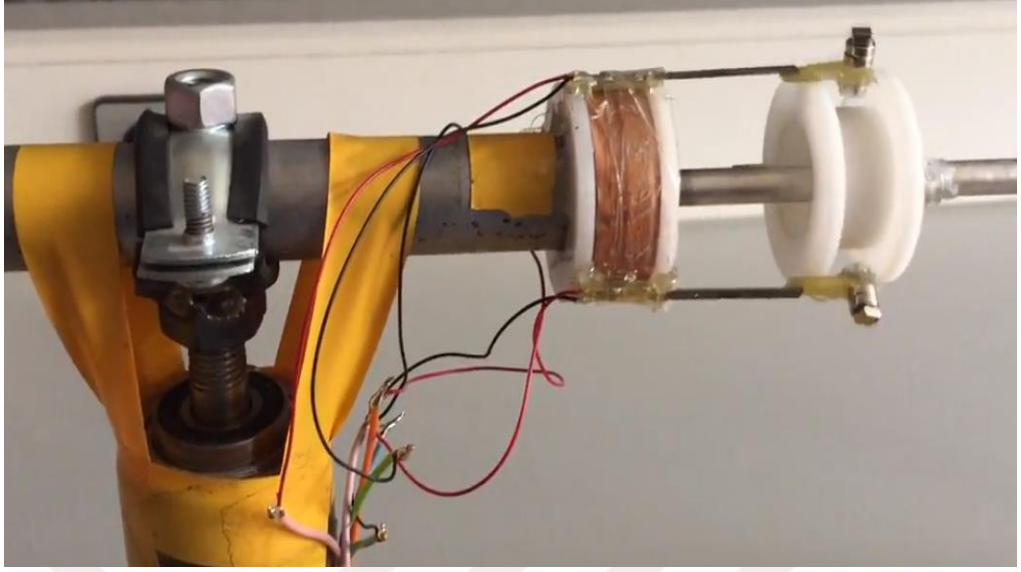
Piezoelektrik enerji hasat sisteminde aynı özelliklere sahip üç piezoelektrik levhadan harmonik bakımından zengin farklı gerilimler üretildiğini görmek mümkündür. Bu temel olarak üç piezoelektrik levhanın farklı rezonans frekanslarından kaynaklanmaktadır. Şekil 3.16. ve 3.17.'de bir osiloskop vasıtasıyla doğrudan üç piezoelektrik tabakanın terminallerinden ölçülmüş gerilimlerin sinyalleri görülmektedir. Doğrultucu devrenin bu dalga formlarını düzeltmeden önce, tüm dalga formlarının harmonik ve süper harmonik içerdiğini görmemiz gerekmektedir. Bu yeni tasarlanan piezoelektrik hasat sistemipiezo levhaların uçlarında farklı sayıda kalıcı mıknatıs olduğunda doğal frekansları farklı dalga formları oluşur.

Şekil 3.12.'de tasarlanan sistemde piezoelektrik terminallerinden elde edilen gerilim sinyallerin elde edilmesinde kullanılan genel devre görülmektedir. Burada, çeşitli rüzgâr hızlarını elde etmede kullanılan rüzgar tüneli, piezoelektrik malzemelerin yerleştirildiği piezoelektrik hasat sistemi, rüzgar hızını ölçmede kullanılan Anemometre, piezoelektrik levhalardan elde edilen gerilim sinyallerini gösteren National Instruments kartı vebilgisayar görülmektedir.



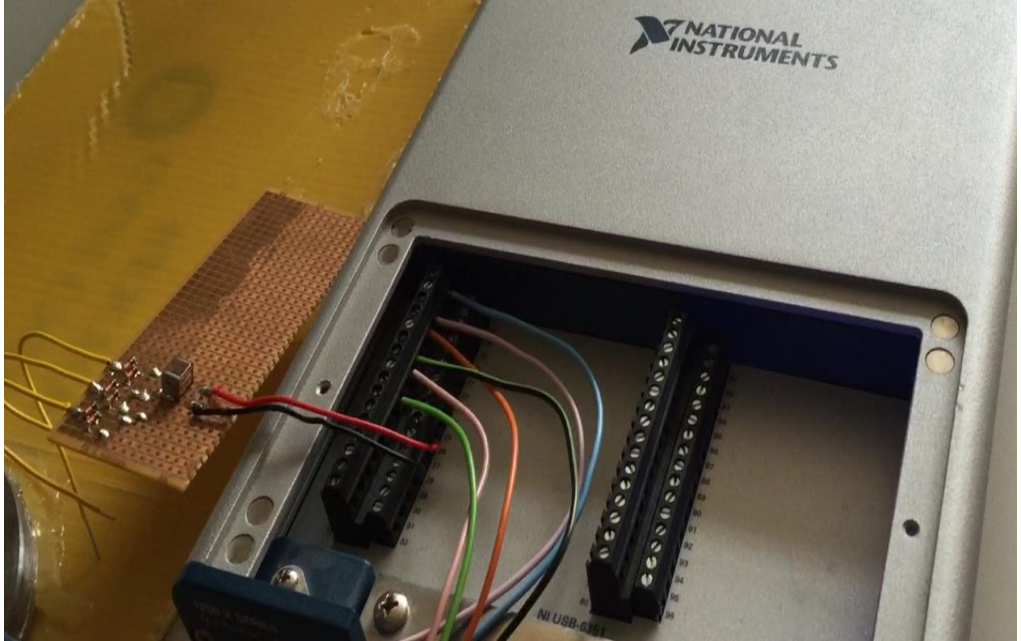
Şekil 3.12. Piezoelektrik terminallerinden elde edilen gerilim sinyallerin görüntüleri genel devresi

Şekil 3.13.'te piezoelektrik terminallerinden gerilim elde edilmesinde kullanılan ve farklı sayıda kalıcı mıknatısın uçlarına yerleştirilen yapısı görülmektedir. Kalıcı farklı sayıda mıknatıs farklı dalga formlarının oluşmasına neden olmaktadır.



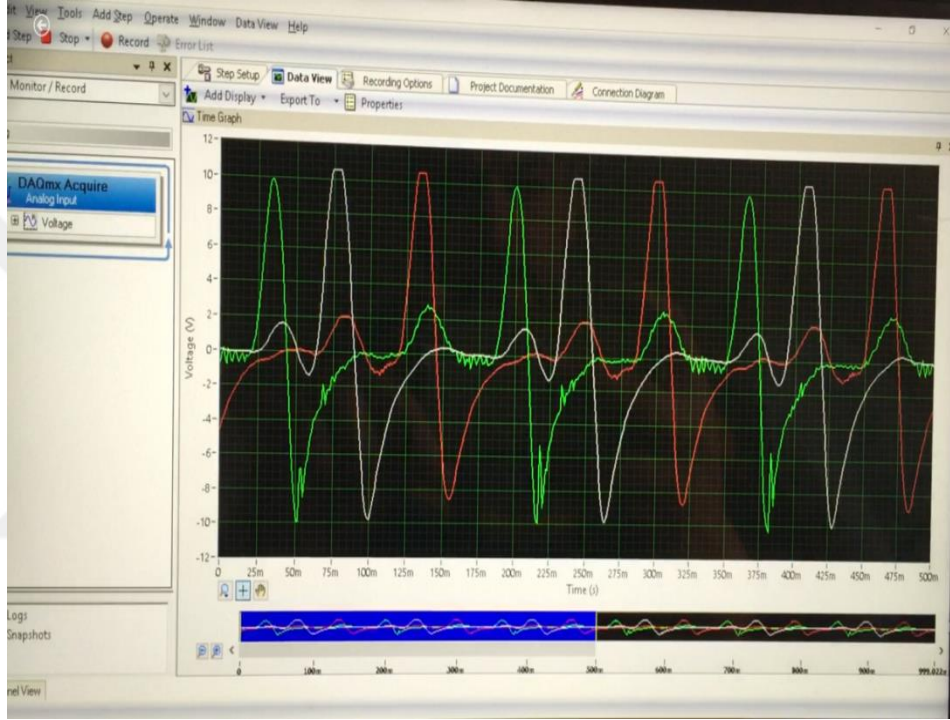
Şekil 3.13. Piezoelektrik terminallerin uçlarına konulan farklı sayıda kalıcı mıknatısın 120 derecelik açıyla konumlanması

Piezoelektrik tabakaların titreşmeleri sonucu ürettikleri farklı frekansta ve farklı genlikteki gerilim sinyalleri kolayca görüntülenebilir. Şekil 3.14.'te bu gerilim sinyallerin bilgisayar ekranında kolayca görüntülenmelerini sağlayan National Instrument kartı görülmektedir.



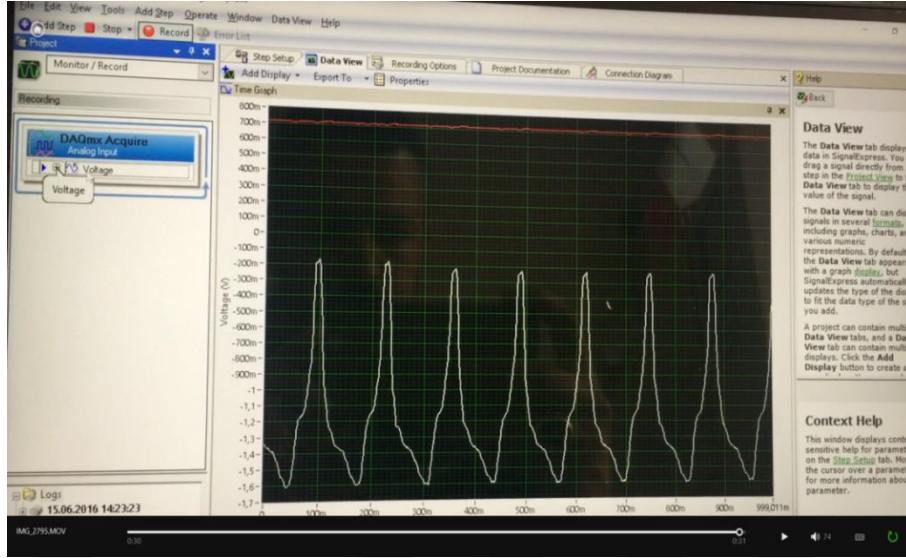
Şekil 3.14. Piezoelektrik tabakalardan elde edilen gerilim sinyallerini bilgisayar ekranında görülmesini sağlayan kart

Bilgisayar yardımı ile piezoelektrik levhalardan elde edilen gerilim sinyalleri eş zamanlı olarak görüntülenebilmektedir. Devrede eş zamanlı olarak çalıştığından sistemin farklı rüzgâr hızlarında ve farklı çıkış yüklerinde denenmesi kolay olmaktadır. Bilgisayar ve arayüz programı sayesinde yapılan deneylerde elde edilen gerilim sinyalleri kayıt edilmekte ve istenilen herhangi bir yerde yedeklemeleri saklanabilmektedir.



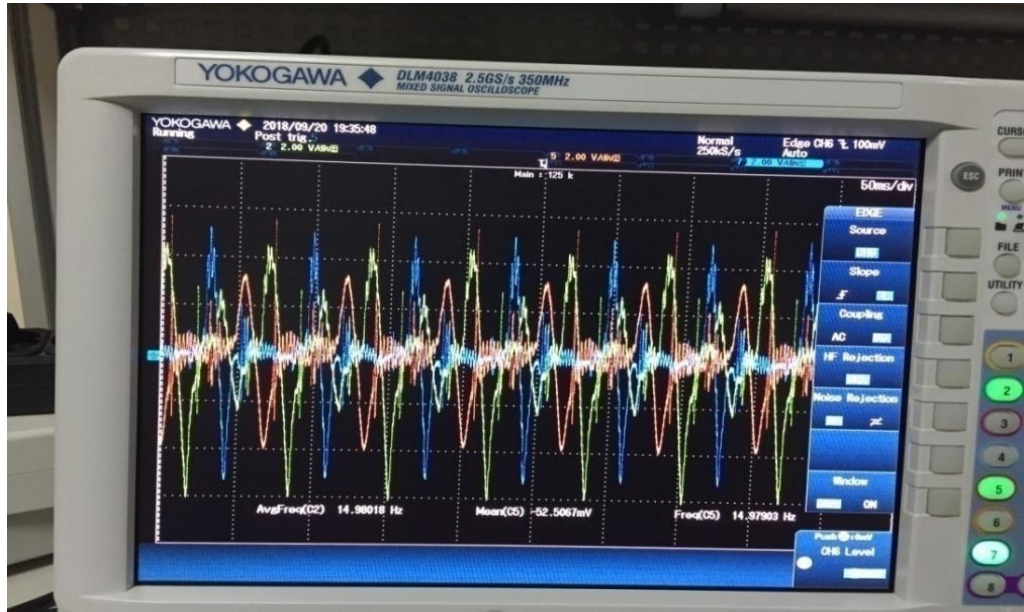
Şekil 3.15. Piezoelektrik levhalardan elde edilen gerilim sinyallerinin ekran görüntüleri

Kullanılan bilgisayar ekranı Şekil 3.15.'te görüldüğü gibi her üç piezoelektrik levhadan alınan gerilim sinyallerini gösterdiği gibi kart eğer üç fazlı tam dalga köprü tipi doğrultucunun çıkışına bağlanacak olursa ekranında doğrultulmuş çıkış sinyalini de eş zamanlı olarak görmek mümkündür. Şekil 3.16.'da doğrultucu çıkışındaki gerilim görülmektedir.

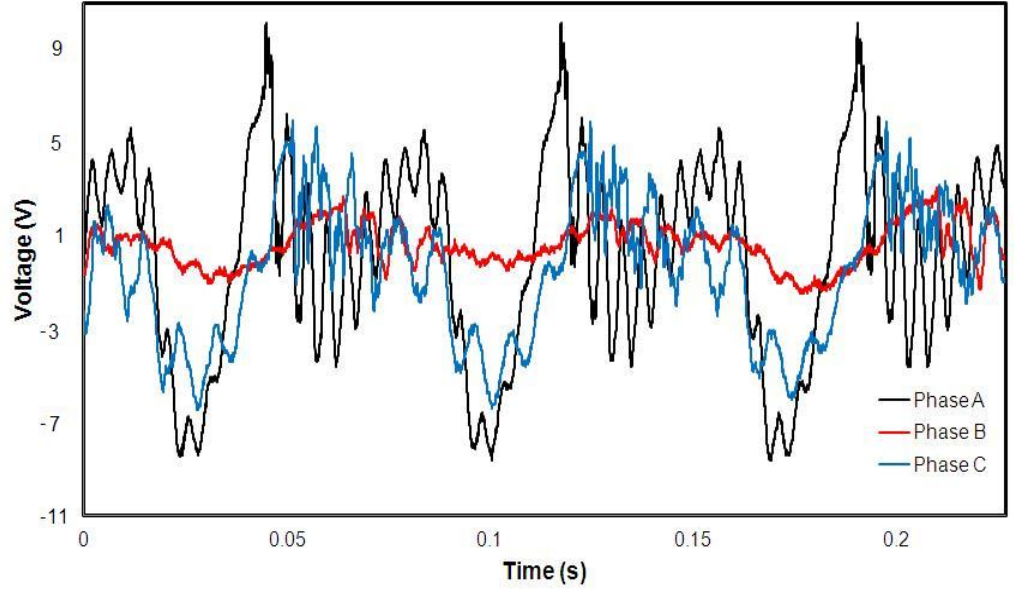


Şekil 3.16. Doğrultucu çıkışındaki gerilim sinyali görüntüsü

Uygulama devresi görüntülerinde de açıkça görüleceği gibi piezoelektrik malzemelerin üzerlerine yerleştirilen mıknatıslar yardımı ile hemen hemen tüm rüzgar hızlarında (0.5 m/s ile 6.5 m/s) sistem enerji üretebilmektedir. Sistem gerçek rüzgar hızlarında kullanıldığında rüzgar hızı=3.2 m/s ve 2.88m/s değerlerinde, R_L yük direnci 800 k Ω değerinde sistemin ürettiği enerji sinyalleri osiloskop yardımı ile Şekil 3.17. ve 3.18.'de görülmektedir.



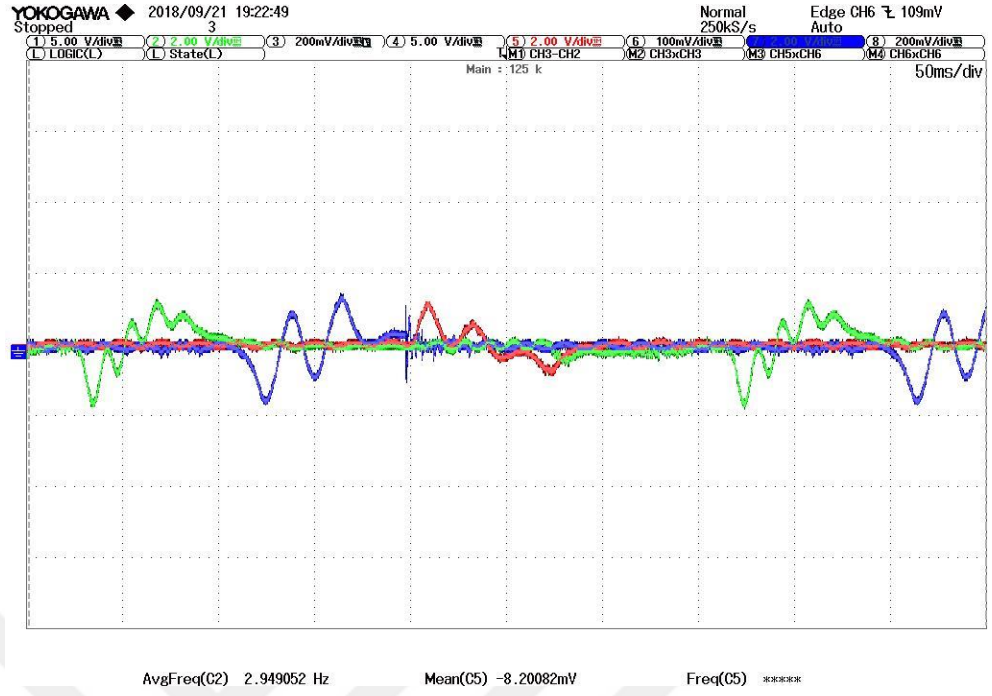
Şekil 3.17. Rüzgar hızı=3.2 m/s ve $R_L= 800$ k Ω değerleri için piezoelektrik katmanların dalga formları osiloskop görüntüsü PZT 203 piezo malzeme kullanılmıştır



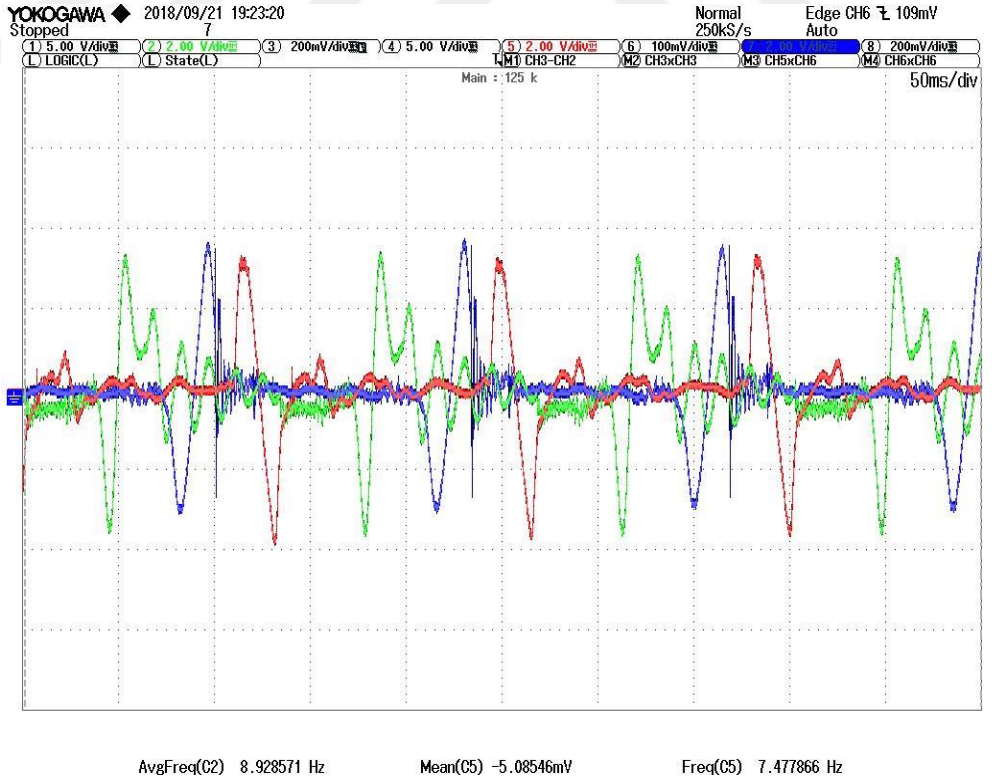
Şekil 3.18. Rüzgâr hızı $v = 2.88$ m/s ve $RL = 800$ k Ω değerleri için piezoelektrik katmanların dalga formları osilloskop görüntüsü PZT 203 piezo malzeme kullanılmıştır.

Piezoelektrik enerji hasat sistemlerinde levhaların titreşimini artırma yollarından biride kalıcı mıknatıs kullanıldığı yöntemlerdir. Tasarlanan piezoelektrik rüzgar enerji hasat(PWEH) sisteminde sabitlenmiş bir kalıcı mıknatısın, piezoelektrik levhaların uçlarına yerleştirilen diğer kalıcı mıknatısların bir birlerini itmesi sonucu levhalar titreşmektedir.

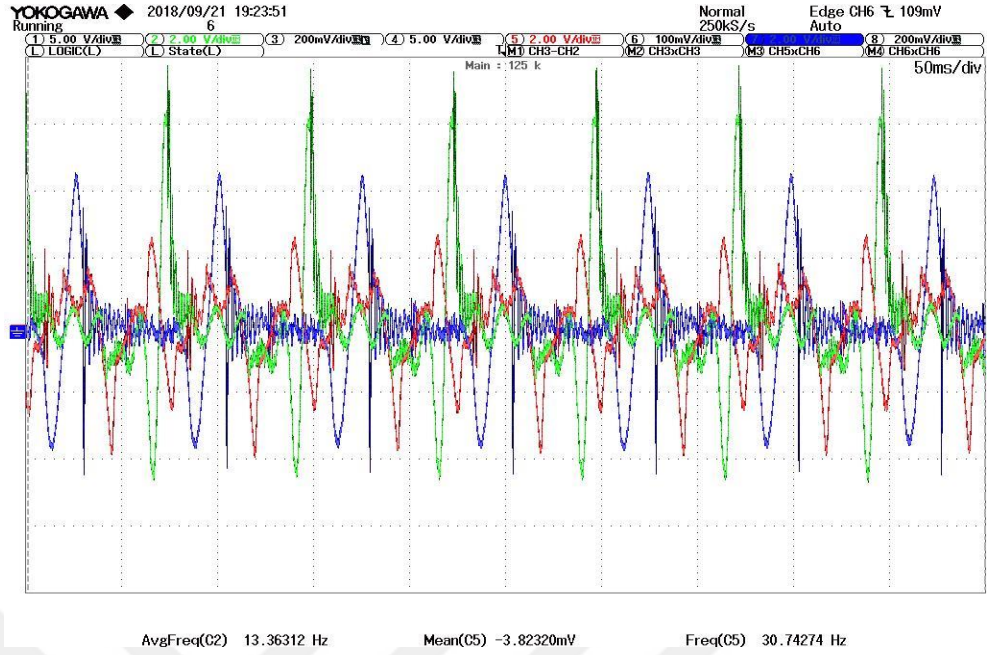
Deneylerde bu levhaların uçlarına 1 cm çapında ve 5 mm kalınlığında ve 0.42 gram ağırlığında farklı sayıda mıknatıs yerleştirilerek deneyler tekrarlanmıştır. Tasarlanan ve deneysel olarakta uygulaması yapılan piezoelektrik rüzgar enerji hasat (PWEH) sistemi piezoelektrik levhaların uçlarına farklı sayıda 2 adet, 3 adet ve 4 adet kalıcı mıknatıs yapıştırılarak sistem farklı rüzgar hızlarında denenmiştir. Burada elde edilen gerilim sinyalleri sistemin yüklü olması ve yüksüz olarak çalıştırılmasında elde edilen sinyallerinin grafikleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 3.19. Rüzgar hızı $v=0.9$ m/sn, ve $m=2 \times 0,42=0.84$ gr. piezoelektrik levhaların uçlarına iki kalıcı mıknatısın yerleştirilmesi ile elde edilen gerilim sinyalleri PZT-203 piezo malzeme kullanılmıştır



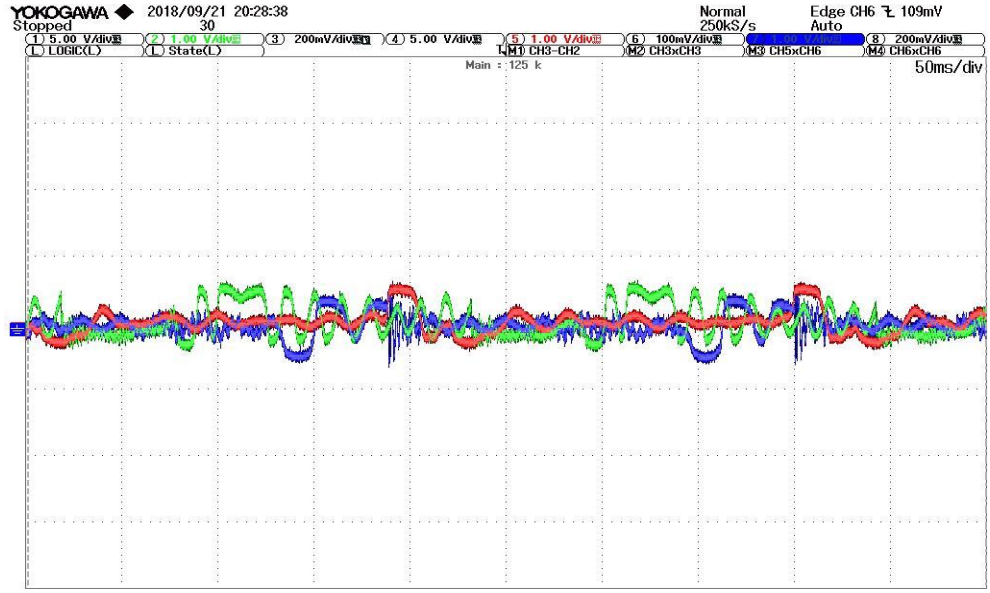
Şekil 3.20. Rüzgar hızı $v=2.9$ m/sn, ve $m=2 \times 0,42=0.84$ gr. piezoelektrik levhaların uçlarına iki kalıcı mıknatısın yerleştirilmesi ile elde edilen gerilim sinyalleri PZT-203 piezo malzeme kullanılmıştır



Şekil 3.21. Rüzgar hızı $v=5.6$ m/sn, ve $m=2 \times 0,42=0.84$ gr. piezoelektrik levhaların uçlarına iki kalıcı mıknatısın yerleştirilmesi ile elde edilen gerilim sinyalleri PZT-203 piezo malzeme kullanılmıştır.

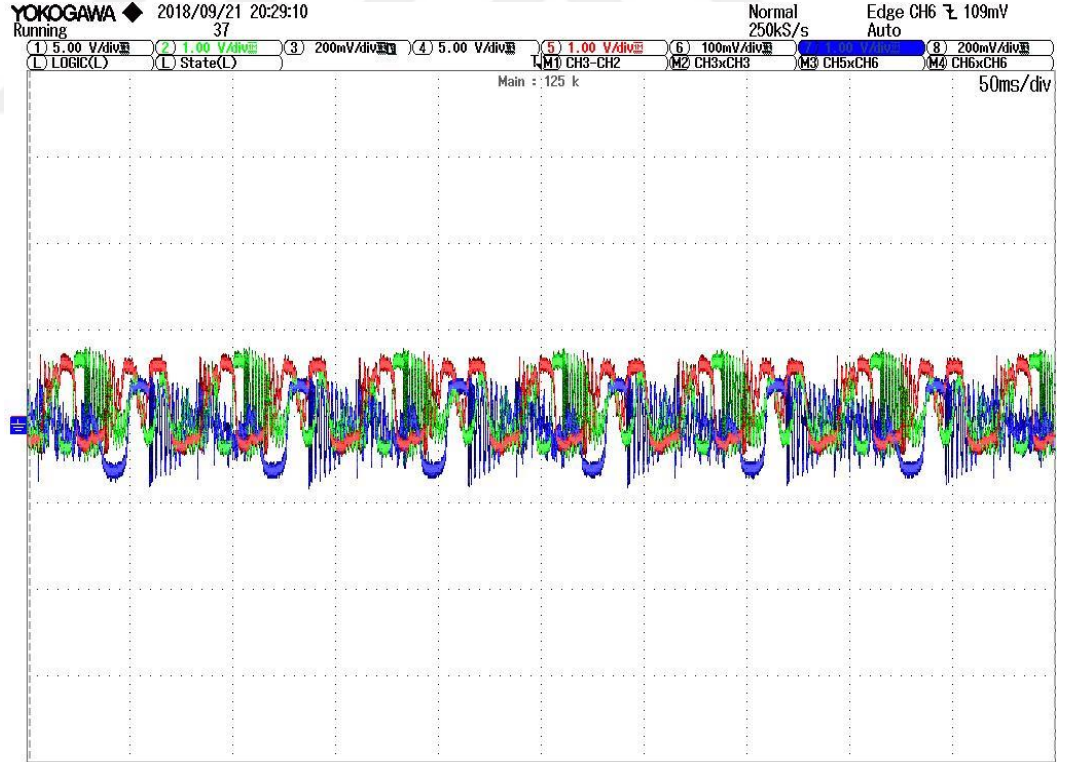
Piezoelektrik levhalar uçlarına farklı sayıda kalıcı mıknatıs eklendiğinde tasarlanan ve deneylere tabi tutulan sistemde devrede çıkış yükü olmadığında birçok harmonik ve süper harmonik içeren farklı frekans ve genlikte gerilim sinyalleri üretmektedirler.

Sistem farklı rüzgâr hızlarında denendiğinde rüzgâr hızı artırıldığında elde edilen sinyallerin genlik değerleri artmaktadır. Şekil 3.22.'de rüzgar hızı 2.9 m/sn, $m=2 \times 0,42=0.84$ gr iki kalıcı mıknatısın olduğu ve sistemde $100k\Omega$ değerinde bir çıkış yükü bağlandığında, Şekil 3.26.'da ise rüzgar hızı 4.7 m/sn, $m=2 \times 0,42=0.84$ gr tekrar iki kalıcı mıknatısın olduğu piezoelektrik levhalardan elde edilen gerilim sinyallerinin grafik görüntüleri gösterilmiştir.



AvgFreq(C2) 34.95488 Hz Mean(C5) -521.400uV Freq(C5) 39.79624 Hz

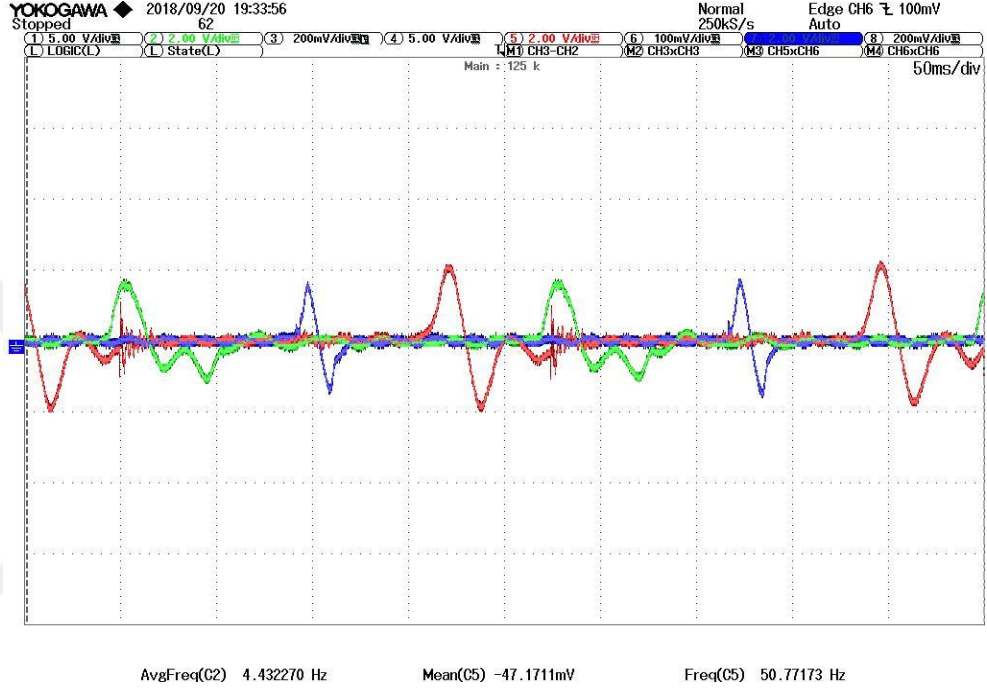
Şekil 3.22. Rüzgar hızı 2.9 m/sn, $m=2 \times 0,42=0.84$ gr.iki kalıcı mıknatısın olduğu ve 100 k Ω değerinde bir çıkış yükü bağlandığında oluşan gerilim sinyalleri PZT-203 piezo malzeme kullanılmıştır



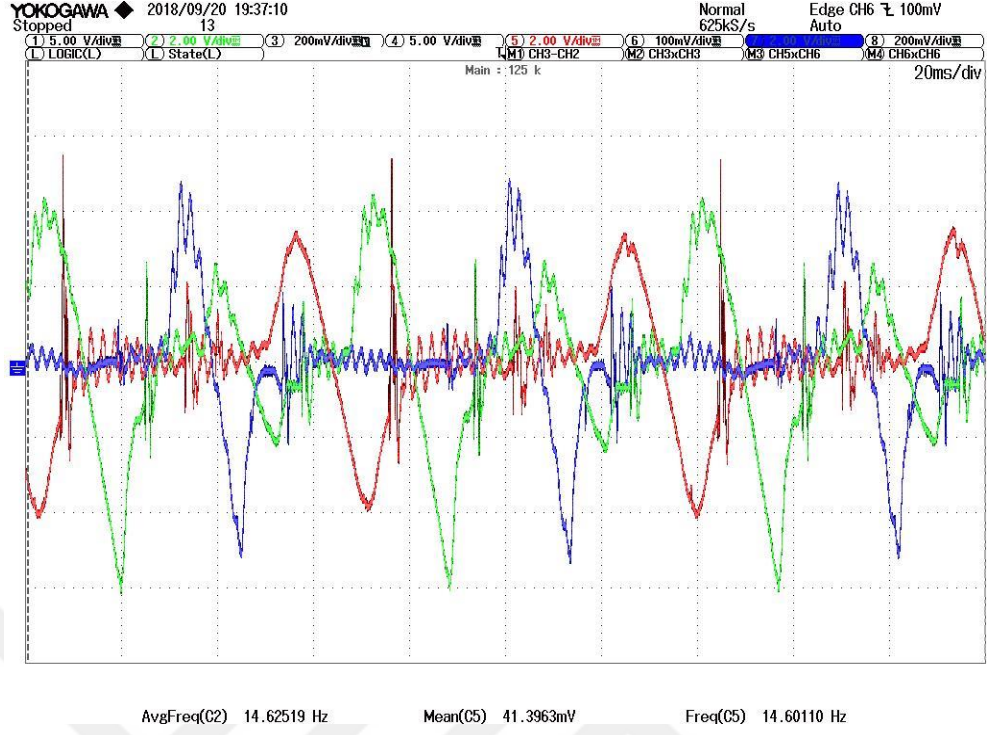
AvgFreq(C2) 156.5634 Hz Mean(C5) 125.370mV Freq(C5) 72.02535 Hz

Şekil 3.23. Rüzgar hızı 4.7 m/sn, $m=2 \times 0,42=0.84$ gr.iki kalıcı mıknatısın olduğu ve 100k Ω değerinde bir çıkış yükü bağlandığında oluşan gerilim sinyalleri PZT-203 piezo malzeme kullanılmıştır.

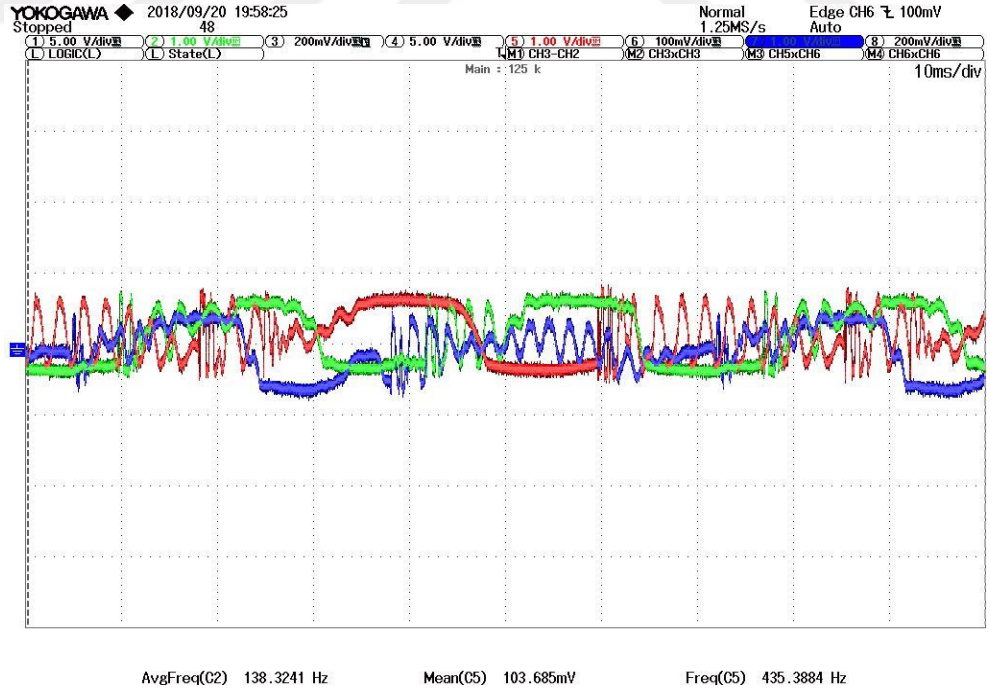
Tasarlanan piezoelektrik rüzgâr enerji hasat sistemi piezoelektrik levhaların uçlarına 3 adet $m=3 \times 0.42=1.26$ gr aynı özellikteki kalıcı mıknatısların yerleştirildiği durumda sistem değişik gerçek rüzgâr hızlarında yüklü ve yüksüz olduğu durumlarda değişik senaryolarla piezoelektrik levhalardan elde edilen gerilim sinyalleri incelenmiştir.



Şekil 3.24. Rüzgâr hızı $v=1.71$ m/sn, ve $m=3 \times 0.42=1.26$ gr. piezoelektrik levhaların uçlarına üçkalıcı mıknatısın yerleştirilmesi ile elde edilen gerilim sinyalleri PZT-203 piezo malzeme kullanılmıştır.

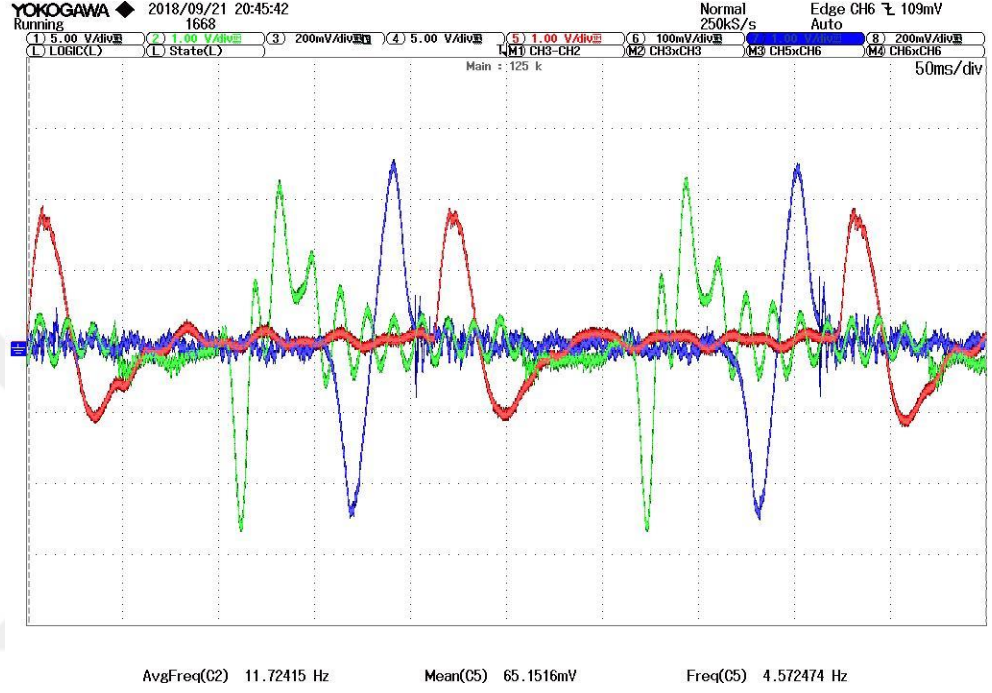


Şekil 3.25. Rüzgar hızı $v=4.7$ m/sn, ve $m=3 \times 0.42=1.26$ gr. piezoelektrik levhaların uçlarına üç kalıncı mıknatısın yerleştirilmesi ile elde edilen gerilim sinyalleri PZT-203 piezo malzeme kullanılmıştır.

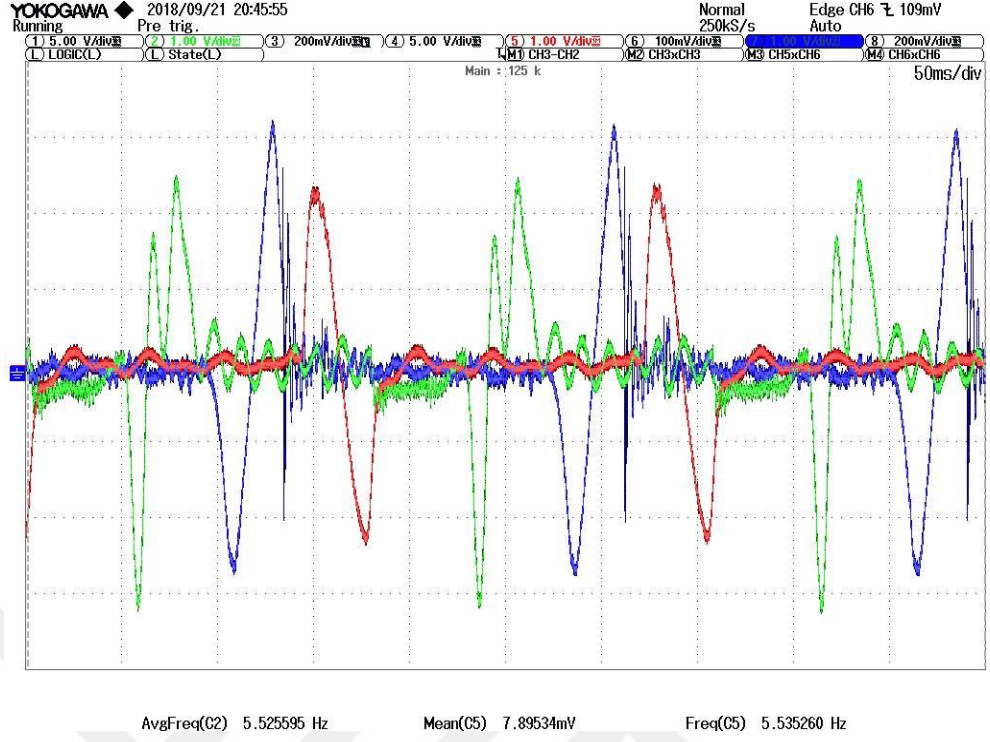


Şekil 3.26. Rüzgar hızı 4.7 m/sn, $m=3 \times 0.42=1.26$ gr. üç kalıncı mıknatısın olduğu ve $100k\Omega$ değerinde bir çıkış yükü bağlandığında oluşan gerilim sinyalleri PZT-203 piezo malzeme kullanılmıştır.

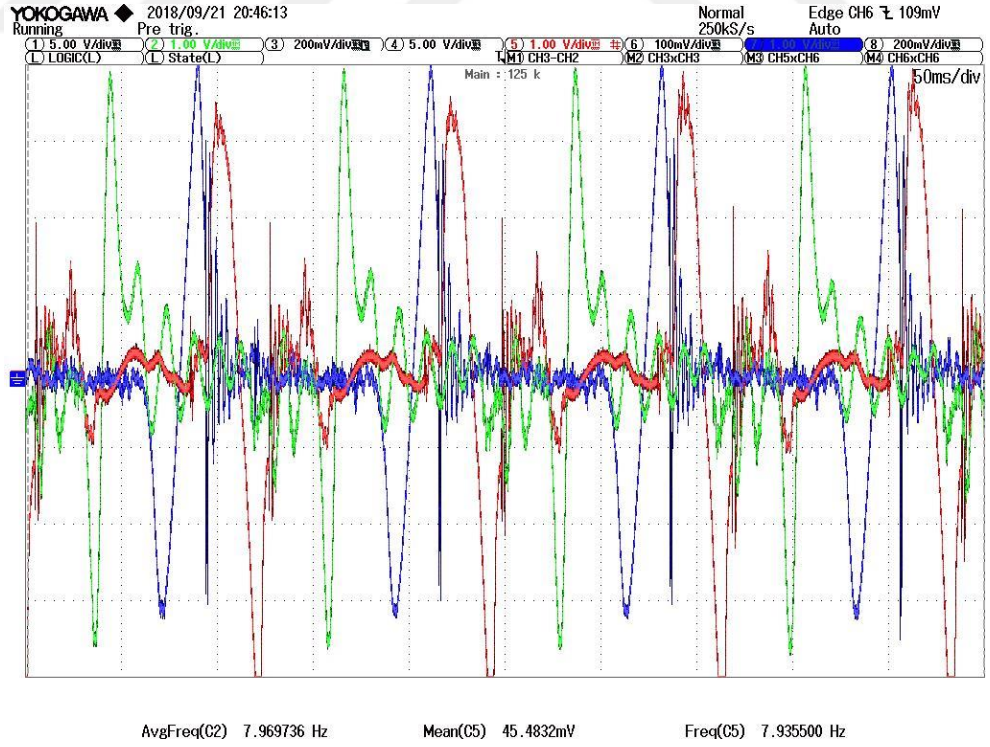
Son olarak tasarlanan piezoelektrik rüzgâr enerji hasat (PWEH) sistemi piezo levha uçlarına 4 adet $m = 4 \times 0.42 = 1.68$ gr aynı özellikteki kalıcı mıknatısların yerleştirildiği farklı ve gerçek rüzgâr hızlarında sistemin yüksüz ve yüklü olduğu durumlarda piezoelektrik levhalardan elde edilen gerilim sinyalleri incelenmiştir.



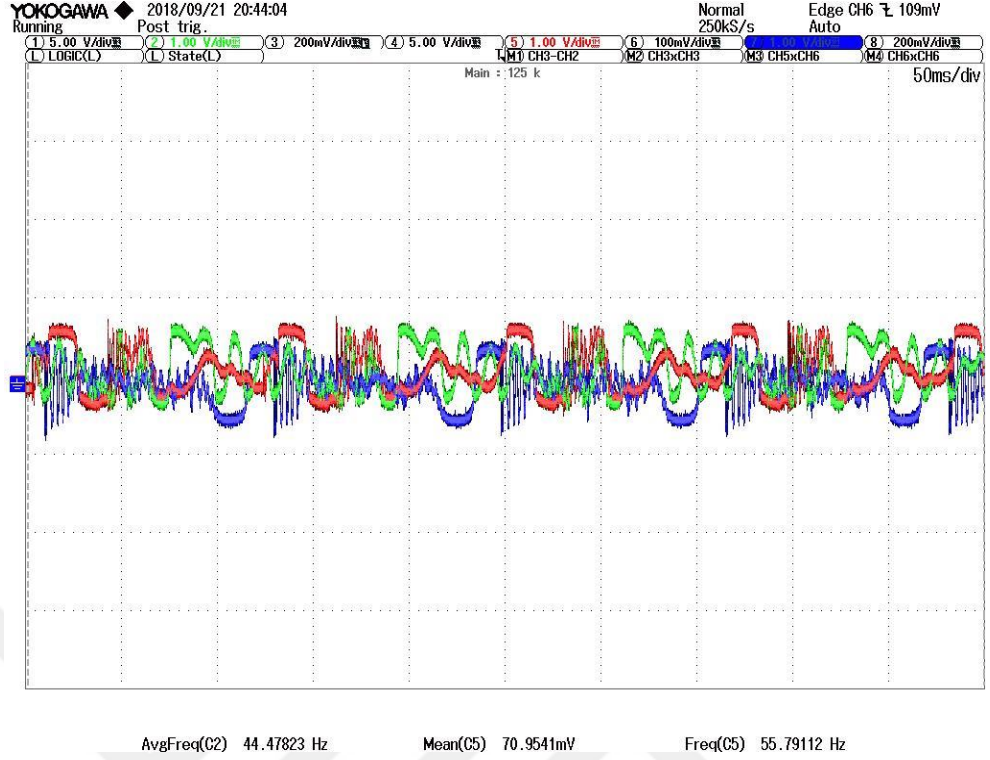
Şekil 3.27. Rüzgâr hızı $v = 1.71$ m/sn, ve $m = 3 \times 0.42 = 1.26$ gr. piezoelektrik levhaların uçlarına üç kalıcı mıknatısın yerleştirilmesi ile elde edilen gerilim sinyalleri PZT-203 piezo malzeme kullanılmıştır.



Şekil 3.28. Rüzgar hızı $v=2.9$ m/sn, ve $m=3 \times 0.42=1.26$ gr. piezoelektrik levhaların uçlarına üç kalıcı mıknatısın yerleştirilmesi ile elde edilen gerilim sinyalleri PZT-203 piezo malzeme kullanılmıştır.

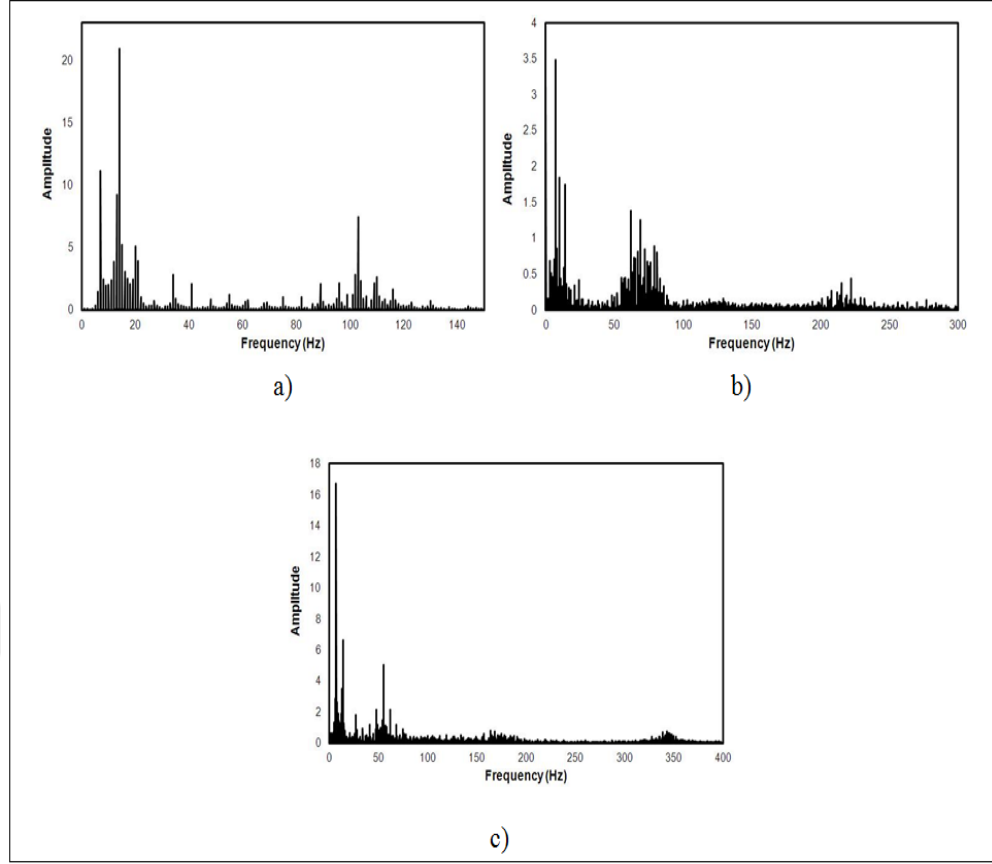


Şekil 3.29. Rüzgar hızı $v=4.7$ m/sn, ve $m=3 \times 0.42=1.26$ gr. piezoelektrik levhaların uçlarına üç kalıcı mıknatısın yerleştirilmesi ile elde edilen gerilim sinyalleri PZT-203 piezo malzeme kullanılmıştır.



Şekil 3.30. Rüzgar hızı 4.7 m/sn, $m=3 \times 0.42=1.26$ gr uç kalıcı mıknatısın olduğu ve $100k\Omega$ değerinde bir çıkış yükü bağlandığında oluşan gerilim sinyalleri PZT-203 piezo malzeme kullanılmıştır.

Bu dalga şekillerine göre, sistem yüksek derecelerde harmonik üretmektedir. Bu nedenle, önce her fazın dalga formlarının FFT'sini analiz edilmiştir. FFT analiz sonuçları Şekil 3.31.(a-c)'de sunulmuştur(Kurt ve ark., 2017).



Şekil 3.31. Piezoelektrik sinyallerin FFT analizleri a) V_{PZ1} 1. piezoelektrik levha, b) V_{PZ2} 2. piezoelektrik levha, c) V_{PZ3} 3. piezoelektrik levha

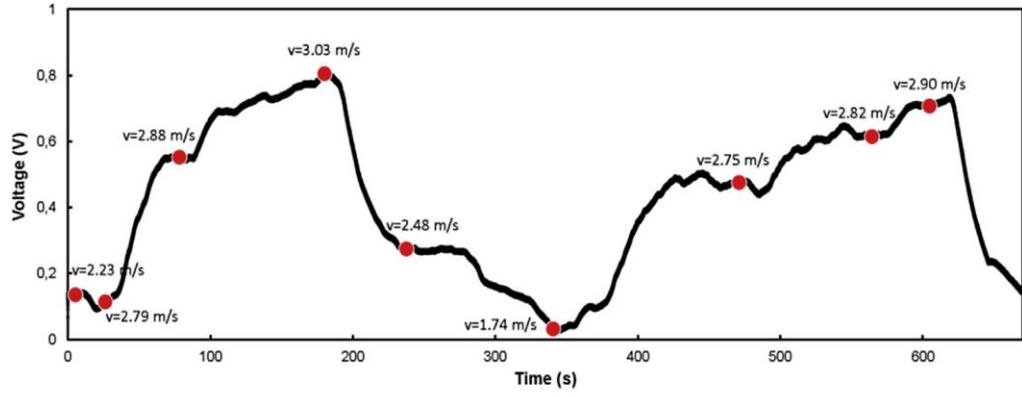
FFT Analiz sonuçlarına göre, her fazın farklı frekans kombinasyonuna sahip olduğunu görüyoruz. V_{PZ1} , 130 Hz'e kadar maksimum frekansa sahipken, V_{PZ2} 280 Hz ve V_{PZ3} 350 Hz'dir. Yüksek frekans bileşenleri en düşük amplitüdlere sahiptirler. Bu dalga formları güç üretimine önemli katkıda bulunmazlar.

Tüm piezoelektrik levhaların ana frekansları çeşitli değerlere sahiptir. Tasarladığımız piezoelektrik hasat sisteminde kullanılan piezo levhalar sırasıyla V_{PZ1} , V_{PZ2} , ve V_{PZ3} katmanları için $f = 13$ Hz, $f = 7$ Hz ve 5 Hz'dir. Bu levhaların her biri için bazı frekans kümelerinin bulunduğunu görmekteyiz.

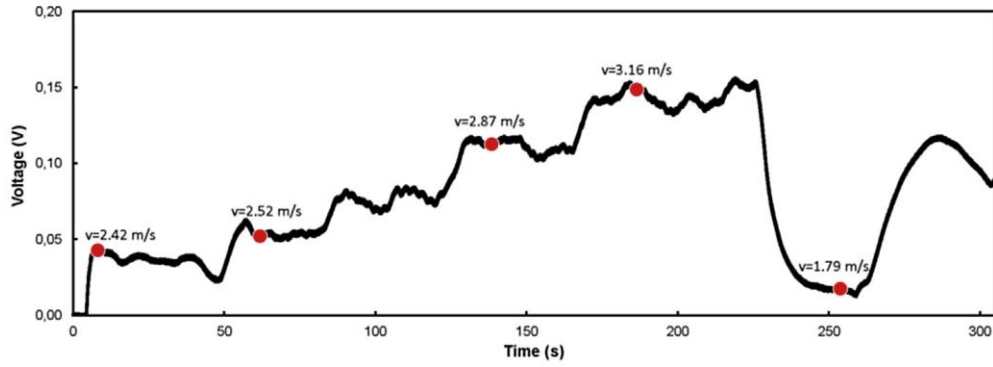
V_{PZ1} piezoelektrik levhanın dalga formu üzerinde yapılan ayrıntılı bir analizde, 7 Hz, 105 Hz, 20 Hz, 35 Hz, 90 Hz, 98 Hz ve 42 Hz değerlerinin, frekans spektrumunun temel bileşenleri olduğunu Şekil 3.31.(a)'da görmekteyiz.

V_{PZ2} piezoelektrik levhanın öncü bileşenler 9 Hz, 13 Hz, 60 Hz, 66 Hz ve 78 Hz olarak Şekil 3.31.(b)'de görmekteyiz. Son olarak V_{PZ3} piezoelektrik levhanın öncü frekans bileşenleri 10 Hz, 53 Hz, 49 Hz ve 58 Hz'lik olarak öncü bileşenlere sahiptir Şekil 3.31.(c). Harmonik analizi açısından toplam harmonik bozulmalar (THD) hakkında ayrıntılı bir analiz yaptık. V_{PZ1} 'in THD değeri %101 olarak bulunmuşken, V_{PZ2} ve V_{PZ3} 'ün THD değerleri sırasıyla %132 ve %70 olarak bulunmuştur. Bu değerlerden de anlaşılacağı üzere, dalga biçimleri son derece bozulmuştur.

Tasarlanan yeni sistemi doğal çevreye benzer koşullar altında test etmek için değişken rüzgar hızları uygulandı. Sistemden optimum güç için $R_L=1M\Omega$ elektriksel yük kullandık. Rüzgâr tüneli $v=2.23$ m/s olduğunda pervaneyi döndürmeye başlamıştır. $v=1.75$ m/s'den daha düşük hızlarda, kondansatör yüklenemiyor, bu nedenle üretilen gerilim doğrudan yük üzerinde harcanmaktadır. Bununla birlikte, rüzgâr hızı $v=2.79$ m/s olduğunda, kondansatör üzerindeki gerilim çarpıcı bir şekilde artmaktadır. Bu şekilde çeşitli rüzgâr hızlarında depolanan enerjinin durumunu analiz ettik. Şekil 3.38.'de farklı rüzgâr hızlarında ve çeşitli çıkış yüklerinde sistemin ürettiği gerilim değerleri gösterilmiştir.



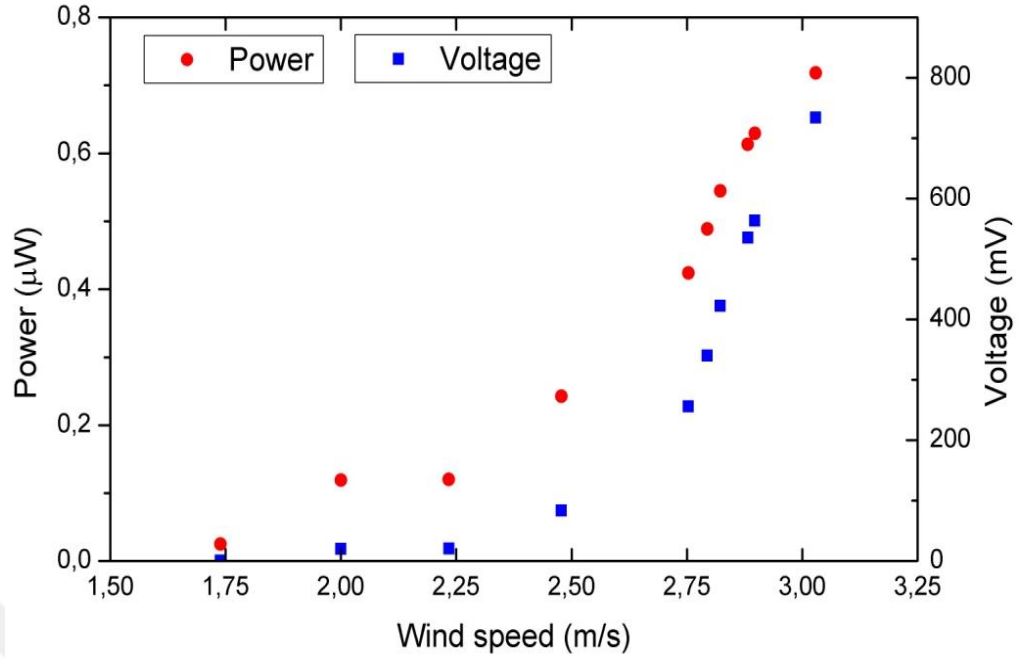
(a)



(b)

Şekil 3.32. Gerçek rüzgâr hızlarında sistemin test edilmesi. a) $R_L = 1\text{ M}\Omega$, b) $R_L = 100\text{ k}\Omega$

Gerçek rüzgâr hızlarında deneysel olarak tasarlanan piezoelektrik hasat sistemin değişik rüzgâr hızlarında çıkışında yük olduğu durumda rüzgâr hızının artırılması ile sistemin enerji üretmeye başladığını ve depolama ünitesi sayesinde bu enerjinin depolandığını görmekteyiz. Rüzgâr hızının artırılması yada düşürülmesinde sistem kondansatöründe enerjinin şarj olması eş zamanlı olarak sistemdeki devre elemanlarının enerji harcıyor olmaları gibi nedenlerden sistemin lineer bir davranış sergileyemediğini görmekteyiz. Sistemin farklı çıkış yüklerinde ve değişik rüzgâr hızlarında ürettiği gerilim değerleri de çok farklılık göstermektedir. Şekil 3.32.(a)'da çıkış yükünün $1\text{ M}\Omega$ ve Şekil 3.32.(b)'de çıkış yükünün $100\text{ k}\Omega$ olduğu durumlarda değişik rüzgâr hızlarında sistemin ürettiği gerilim grafikleri gösterilmiştir. Şekil 3.33.'de yük direnci $R_L = 1\text{ M}\Omega$ için değişik rüzgâr hızlarında gerilim ve güç grafiği incelenmiştir. Grafikten de anlaşılacağı üzere rüzgâr hızı $v = 1.75\text{ m/s}$ değerinde sistemin yüklendiği, $v = 2.25\text{ m/s}$ değerinde ise gücün hızlı bir şekilde yükseldiği ancak $v = 2.85\text{ m/s}$ 'den sonra düştüğü görülmektedir.



Şekil 3.33. $R_L=1M\Omega$ değerinde farklı rüzgar hızları için gerilim ve güç değişimi

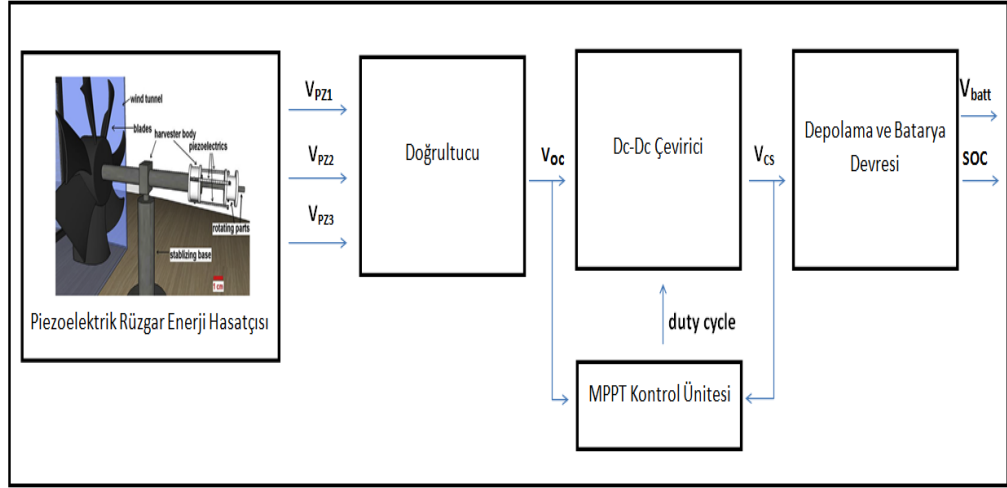
Tasarlanan piezoelektrik rüzgar enerji hasat (PWEH) sisteminin değişik rüzgâr hızlarında çıkış gücü özellikleri ve gerilim-güç dalga biçimleri yukarıda ayrıntılı olarak anlatıldığı gibi incelenmiştir. Üç piezoelektrik levhadan (V_{PZ1} , V_{PZ2} , V_{PZ3}) alınan dalga şekillerinin doğrusal olmayan özelliklere sahip olduğu gözlemlenmiştir. Cihaz üç özdeş piezoelektrik tabakaya sahip olmasına rağmen, piezoelektrik malzemelerin ucundaki mıknatıslarınlevhaların doğal frekanslarını etkilediği görülmüştür. Elde edilen güç, 1,75 m/s gibi düşük bir rüzgar hızında $0,2\mu W$ olarak ölçülmüştür. Doğrudan piezoelektrik terminallerden gelen güç miktarı ise $3,8\mu W$ olarak ölçülmüştür. Dalga şekillerinin çok sayıda düşük harmonik ve süper harmonik bileşen içermesi bu duruma neden olmaktadır. Sistemin toplam harmonik distorsiyonu (THD) yaklaşık %130 civarında ve bu değer doğrusal olmayan etkilere bağlı olarak oldukça yüksektir. Sistemin yüksek bir THD göstermesi, akım ve gerilim karakteristiklerinin doğrusal olmaması bu kaynağın enerji üretimi verimini düşürmektedir. Öyle ki, sistemde sinyalin %20'si ancak düzeltilebilmekte ve toplanan enerji kondansatörde depolanabilmektedir. Bu olumsuzluğu en aza indirmek için maksimum güç noktası izleme (MPPT) yöntemi ile DC-DC dönüştürücü kontrol edilmiştir. Böylece, tasarlanan sistemden elde edilen gücün maksimum seviyede kullanılması hedeflenmiştir.

3.2. Yöntem

Bu çalışmada, yeni bir piezoelektrik rüzgâr enerji hasat sistemi (PWEH) uygulanması için maksimum güç noktası izleme (MPPT) yöntemi önerilmektedir. Böyle bir MPPT ünitesinin kullanılması, piezoelektrik tabakalardan elde edilen gerilim dalga biçimlerinin, yüksek toplam harmonik bozulma (THD) içermesi ile üretilen güç veriminin düşük olmasından dolayıdır. Yüksek THD değerleri PWEH sisteminin çıkışında belirli bir güç kaybına neden olur (Tabesh ve Fréchet, 2010).

Şekil 3.40.'ta kullanılan MPPT sistemi birçok farklı piezoelektrik hasat çalışmaları için yaygın olarak kullanılmaktadır (Elliott ve Mitcheson, 2014). MPPT başlangıçta, piezoelektrik levhalardan gelen gerilim sinyallerini (V_{PZ1} , V_{PZ2} , V_{PZ3}), doğrultucu devre sayesinde hasat sisteminin açık devre gerilimi V_{OC} filtrelenmiş bir gerilim olarak kapasitörde depolar. Enerji hasat sistemlerin çoğunda maksimum güç transferi açık devre geriliminin yarısı $V_{OC}/2$ değerinde gerçekleşir (Shu ve ark., 2007). $V_{OC}/2$ kontrolün performans şartı için kritik bir değer olarak kabul eden MPPT ünitesinin yardımıyla bir DC-DC dönüştürücünün kontrolü sağlanır. Depolama ve batarya ünitesi yardımı ile elde edilen enerji depolanır (Shu ve ark., 2007).

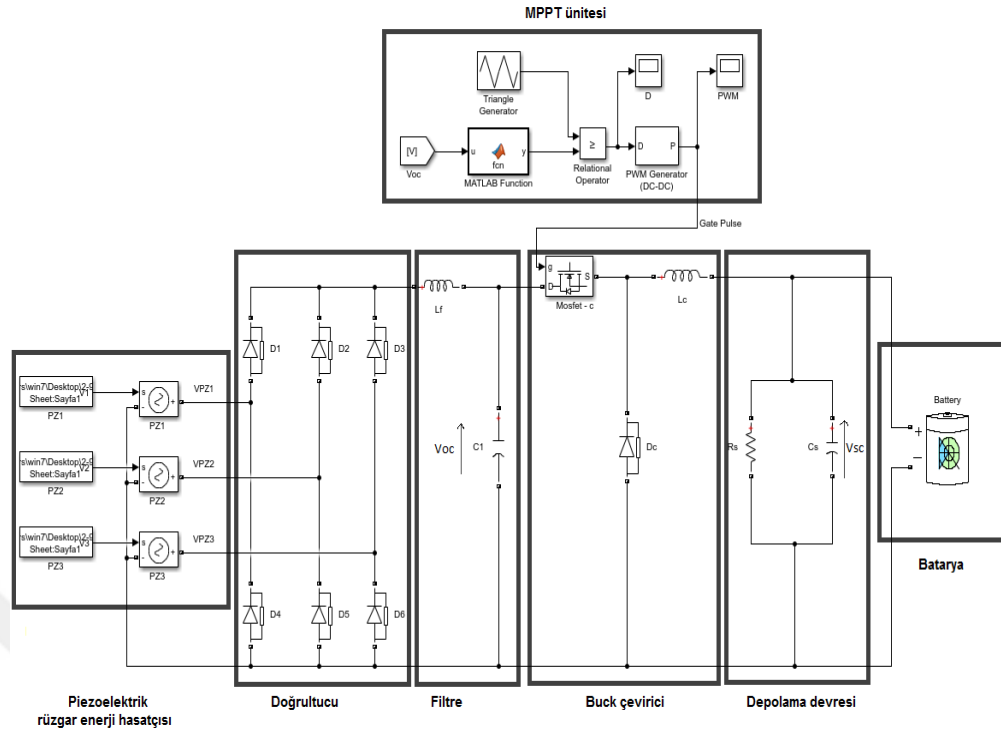
Güç kaybının olmaması için kullanılan tüm elemanların düşük güç tüketen (low power) devre elemanlarından seçildiği ve MPPT yöntemi kullanılarak tasarlanan piezoelektrik rüzgâr enerji hasat sisteminin verimini %98,41 oranında artırdığı sadece 5.29 μ W gibi düşük güç tüketimine sahip bir sistem olduğu kanıtlanmıştır.



Şekil 3.34. Piezoelektrik rüzgâr enerji hasat sistemi genel şeması

3.2.1. Piezoelektrik rüzgâr enerji hasat sistemi ve MPPT devre benzetimi

Sistemin gerçek tasarımı yapılmadan önce ayrıntılı bir benzetimi gerçekleştirilmiştir. Sistem önce Matlab/Simulink programı kullanılarak tasarlanmış ve benzetim üzerinde gerekli ve ayrıntılı çalışmalar yapılarak denenmiştir. Daha sonra benzetim ile tasarlanan ve uygulaması yapılan devrenin deneysel sonuçları karşılaştırılmıştır. Sistemin tasarımının yapılmasından önce Matlab/Simulink programı kullanılarak benzetiminin yapılması devre elemanlarının düşük güç tüketen elemanlardan seçilmesi, bu devre elemanlarının davranışlarının sisteme uygunluğu, sistemin değişik rüzgâr hızlarında denenebilmesi, gereksiz zaman ve maliyet kayıplarının önüne geçmek için tercih edilmiştir. Tasarlanan piezoelektrik rüzgâr enerji hasat (PWEH) sistemi ve önerilen MPPT denetleyici sisteminin blok diyagramının ayrıntılı benzetimi şematik gösterimi Şekil 3.35.'te gösterilmiştir.



Şekil 3.35. Piezoelektrik rüzgâr enerjisi hasat makinesi için mppt kontrol devresinin ayrıntılı benzetimi şematik gösterimi

Piezoelektrik rüzgâr enerjisi hasat sistemi için yapılan bu benzetim diyagramı bir AC-DC doğrultucu, bir DC-DC dönüştürücü, bir MPPT denetleyici devresi ve depolama ünitesi olarak bir elektrokimyasal pil içerir. V_{PZ1} , V_{PZ2} , V_{PZ3} , üç piezoelektrik levhanın (PZ1, PZ2, PZ3) ürettikleri gerilimleri, V_{OC} , $V_{OC}/2$, açık devre gerilim ve yarısı değerlerini, V_{SC} , V_{bat} depolama ve batarya gerilimleri dalga biçimlerini gösterir. Deneysel çalışmayı uygulamadan önce, Şekil 3.35.'e göre detaylı bir benzetimi yapılmıştır.

Benzetim çalışması için optimize edilmiş parametreler Çizelge 3.1.'deki gibi belirlenmiştir. Bu çizelgeye göre, DC-DC dönüştürücü 0.3 mH, 1.85 mF ve 50 Ω bileşenlerine sahip bir mosfet elemanı ile çalışır. Kontrol ünitesinde, 72 V maksimum giriş 10 kHz anahtarlama frekansı ile yaklaşık 12 V'a dönüştürülmüştür. Batarya ve depolama ünitesinde kurşun-asit tipi bir batarya kullanılmıştır.

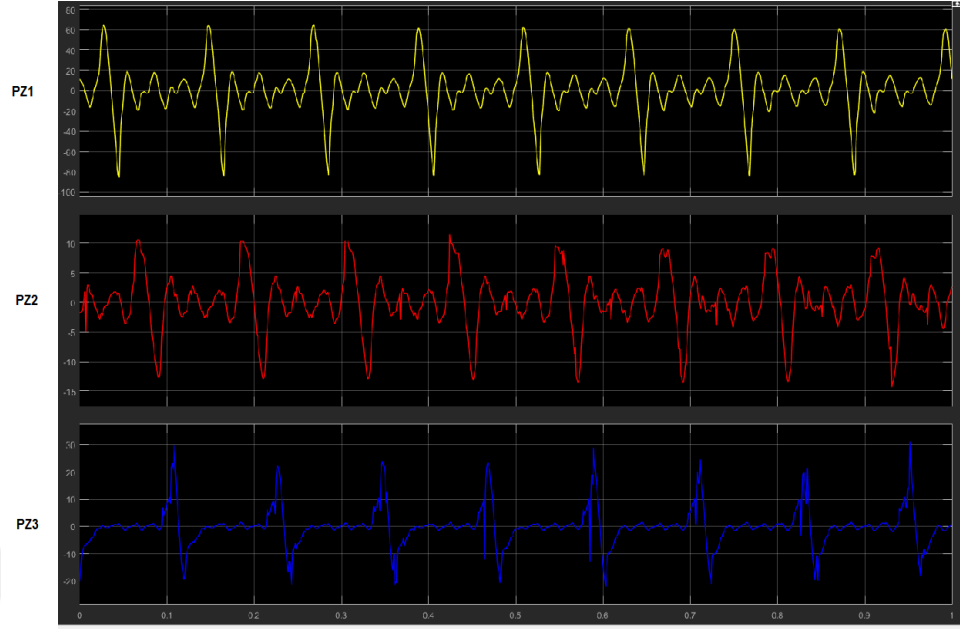
Üç piezoelektrik levhadan elde edilen gerilimler (V_{PZ1} , V_{PZ2} , V_{PZ3}) başlangıçta bir tam dalga doğrultucu devresine aktarılır. Filtre devresi üzerinde C1 kondansatöründe biriken V_{OC} gerilimi MPPT kontrol devresi için bir DC-DC dönüştürücüye yönlendirilir. Bu aşamada, MPPT denetleyicisi $V_{OC}/2$ gerilim seviyesi mantığını kullanarak anahtarlama yapar. Ardından, dönüştürücünün kontrollü çıkışı bir gerilim ve şarj durumu üretmek için bir depolama devresine iletilir.

Deneyisel çalışma için optimize edilmiş parametreler, Çizelge 3.2.'deki gibi tespit edilmiştir.

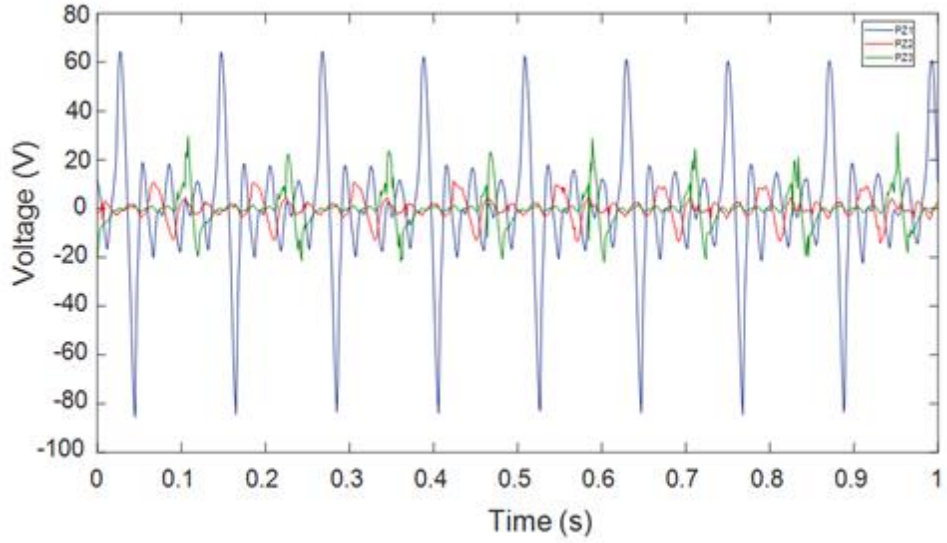
Çizelge 3.2. MPPT güç devresinin optimize edilmiş parametreleri

S.N.	Kullanılan ürün	Değerler
1	PZT-203 piezo malzemesi	1.4 g 26nF 380N/m 0.12N 275 Hz
2	Output filter, L_f , C_1	0.7mH 70mF
3	Buck converter Switch, L_c , C_s , R_s	MOSFET 0.3mH 1.85mF 50Ω
4	MPPT controller unit V_{oc} , V_{sc} , switching frequency	72 V 12 V 10 KHz
5	Battery type, nominal voltage, rated capacity, max. capacity, fully charged voltage, nominal discharge current, internal resistance	Lead-acid. 12 V, 12 V, 6.5Ah, 6.825Ah, 12.6 V, 0.1837 A, 0.018462 Ω

Şekil 13.35.'te ayrıntılı benzetimi gösterilen çalışmanın detaylı bir analizi yapılacaktır. Benzetimde de açıkça görüleceği gibi önce piezoelektrik levhalardan elde edilen dalga biçimlerinin bir örneği yani doğrultucu için giriş dalga biçimleri (V_{PZ1} , V_{PZ2} , V_{PZ3}) Şekil 13.36.'da gösterilmektedir. Piezoelektrik levhalar 120 derecelik açılmalara yerleştirilmiş, genlik ve frekansları farklı dalga formları üretmektedirler. Gerilim sinyallerine baktığımızda aslında, yüksek harmonikler içerdiklerini ve bazı durumlarda toplam harmonik bozulma (THD) değerlerini %50'nin üzerinde olduğunu görmekteyiz.



a)



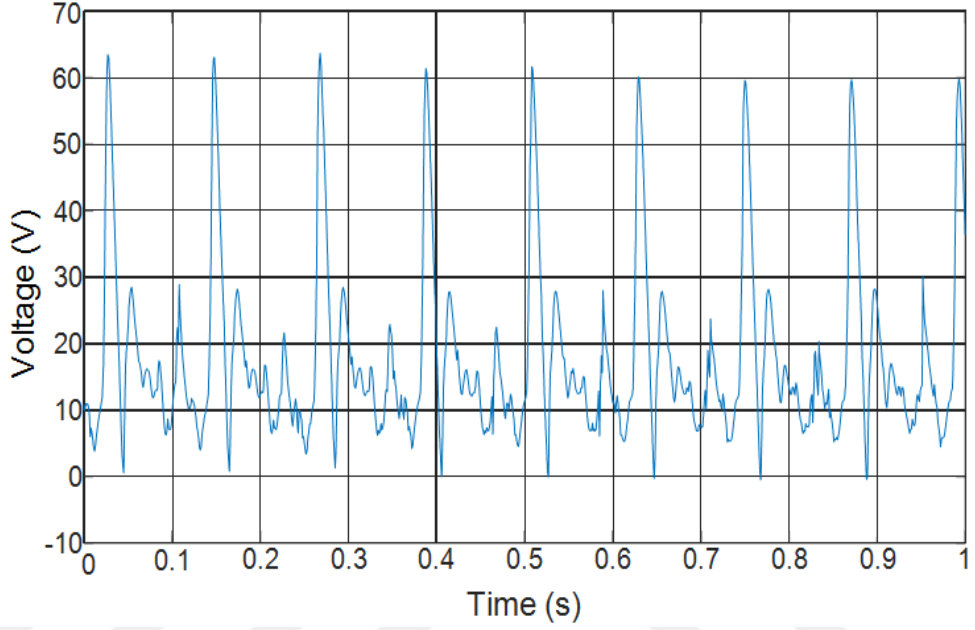
b)

Şekil 3.36. V_{PZ1} , V_{PZ2} ve V_{PZ3} piezoelektrik levhaların dalga formları osiloskop görüntüleri PZT-203 piezo malzeme kullanılmıştır.

AC-DC doğrultucu kısmında, AC gücün DC bir güce dönüştürülmesi için yaygın olarak bu doğrultucular kullanılır. Bu çalışmada, ilk önce Şekil 3.36.'daki gibi dalga formları üç fazlı bir tam dalga doğrultucunun girişine verilmiştir. Sistemden maksimum güçle elde etmek için optimal bir doğrultucu gerilimi V_{rect} vardır.

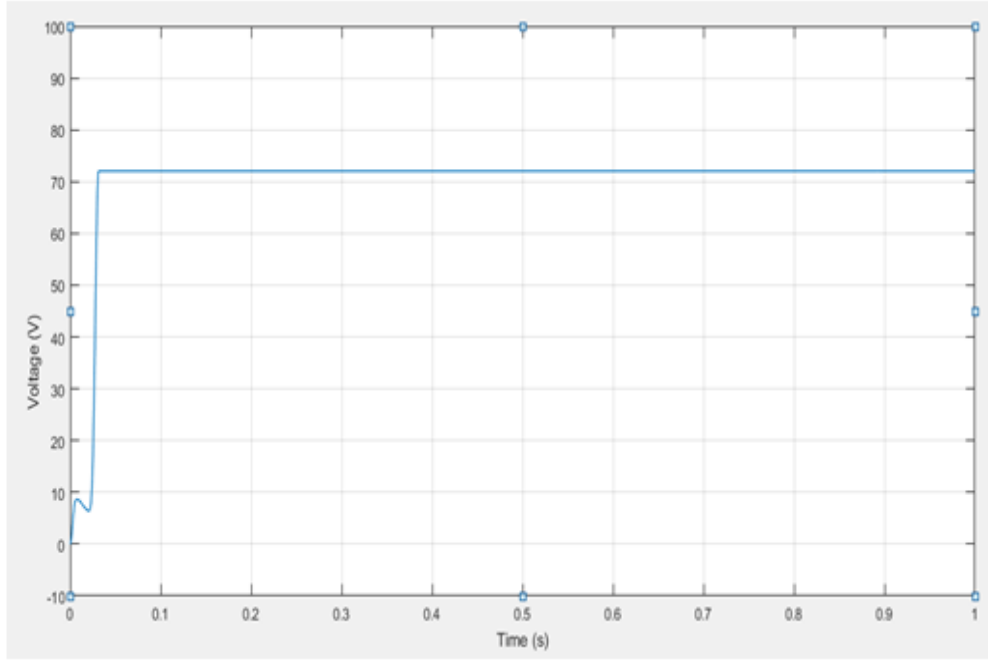
Optimum doğrultucu gerilimi V_{rect} , denklem (3.1)'de görüldüğü gibi, açık devre gerilimi V_{in} 'in yarısıdır. Şekil 3.37'de doğrultucu devresi üzerinde doğrultulmuş bir gerilim sinyali görülmektedir.

$$V_{rect} = V_{in}/2 \quad (3.2)$$



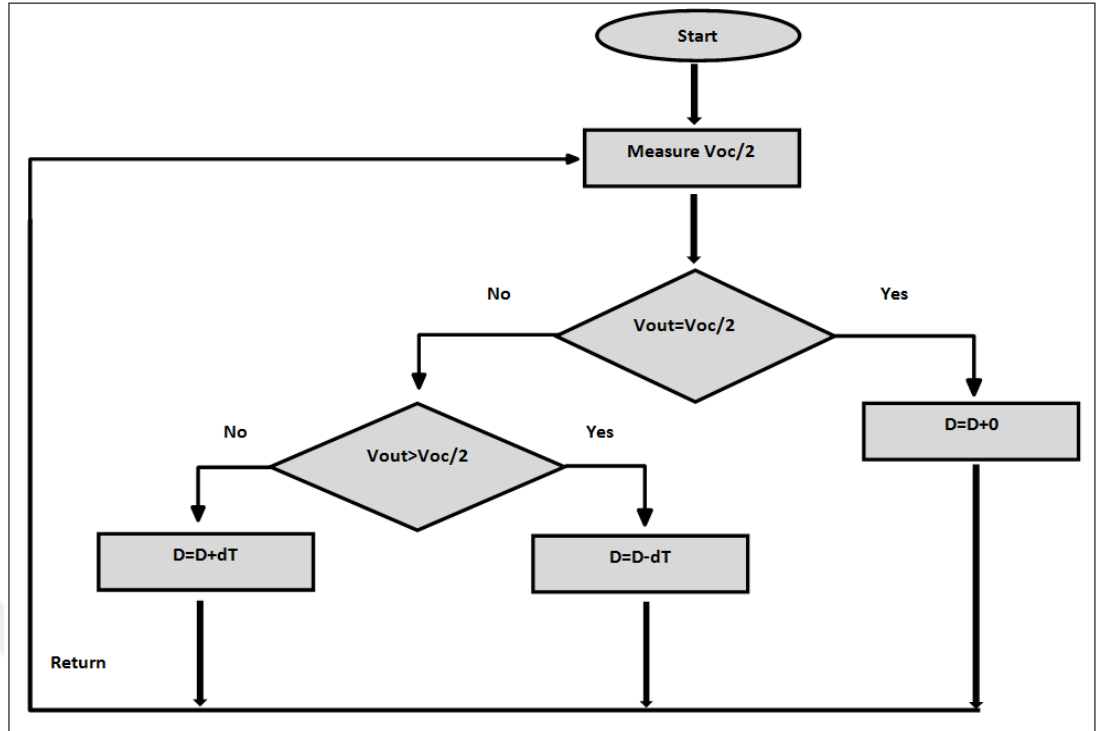
Şekil 3.37. Doğrultulmuş gerilim sinyali (V_{rect}) dalga formu osiloskop görüntüsü

LC filtre devresi kısmı; çıkış geriliminin doğrultucudan sonra gerilimin daha düzgün bir şekilde doğrultulmasında sıklıkla kullanılan bir uygulamadır. Etkili bir filtre kullanılarak akım-gerilim dalgalamalarının önüne geçilebilir. Çalışmada kapasitör-indüktör filtresi, Şekil 3.38.'de görüldüğü gibi doğrultucunun çıkış gerilimini filtrelemiştir.



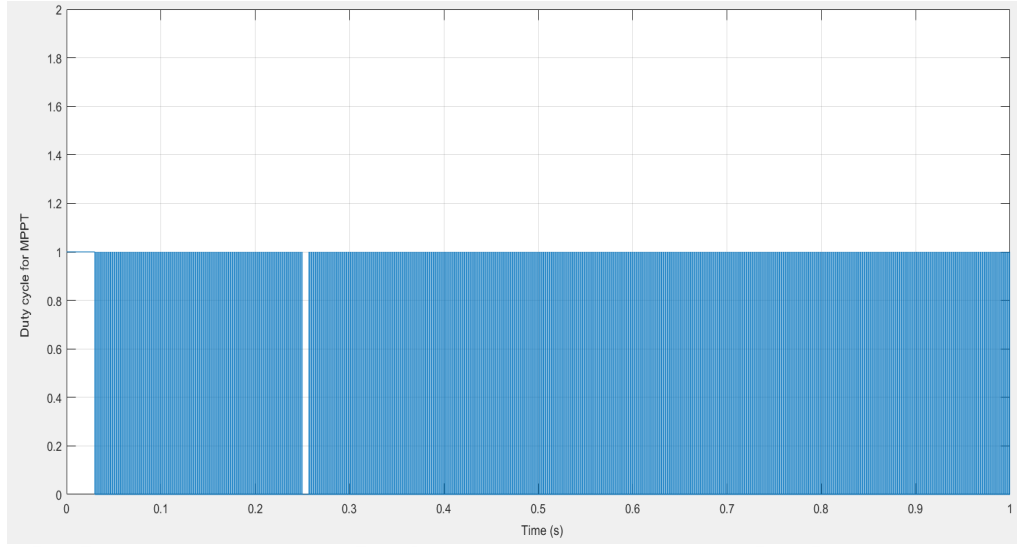
Şekil 3.38. Ölçülen V_{OC} gerilim dalga formu

Burada, LC filtresinin temel başarısı, bu doğrultulmuş gerilim biçimini, girişteki yüksek THD değerlerine sahip dalga biçiminden elde etmektir. Bu nedenle, LC filtre devresindeki kondansatör ve bobin değerleri önemli bir rol oynamaktadır. Buck dönüştürücü kısmında; piezoelektrik hasat uygulamalarında güç seviyeleri genellikle çok düşüktür. Bu bakımdan, Buck dönüştürücü, karmaşık sistemlerde güç dönüşümü için popüler bir topolojiye sahiptir. Buck dönüştürücü, yüksek bir voltaj aralığından gerekli gerilimi sağlar. Dönüştürücü, Şekil 3.41.'de gösterildiği gibi bir aktif anahtara sahiptir. MPPT kontrol devresi kısmında; maksimum güç noktası izleme algoritmasının akış şeması Şekil 3.39.'da verilmiştir. Başlangıçta MPPT ünitesi V_{oc} 'in yarısını ölçer. Ardından voltaj çıkışını bu değer olarak ayarlar. Çıkış gerilimi bu değerden farklı ise, çıkış gerilimi $V_{oc}/2$ değerine mümkün olduğunca yakın yapılır. Bu ayardan sonra, her bir zaman adımı için, açık devre gerilimi ve beklenen maksimum güç noktası gerilimi, sırasıyla V_{oc} ve $V_{oc}/2$ ile gösterilir. Ek olarak, çıkış kondansatörü üzerindeki gerilim V_{out} , görev döngüsü (duty cycle) da $D = t_{on}/T_s$ dir. Buck tipi düşürücü bir çeviricide bu değer en çok $D=V_{out}/V_{oc}$ şeklinde olur. Optimum güç noktasının belirlenmesi için görev döngüsünün (duty cycle) değişimi dt ile verilmiştir.

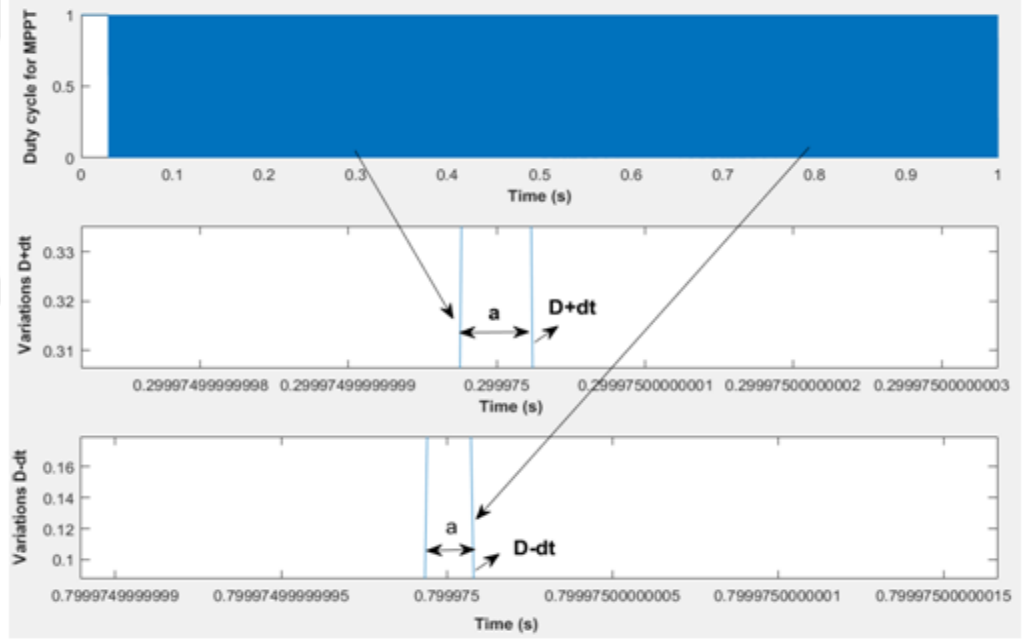


Şekil 3.39. MPPT algoritmasının akış şeması.

Şekil 3.40.(a)'da kontrol ünitesi için (duty cycle) görev dögüsü dalga gösterilmiştir. Burada açıkçası, kontrol denetleyicinin beklendiği gibi işlevini sürdürebilmesi için 0 dan 1 'e değişen değerler almaktadır. dt hesaplanırken örneğin buck konvertörün $t=0.3$ sn ve $t=0.7$ sn giriş ve çıkış gerilim oranı yapılarak D değeri bulur ($D=V_{out}/V_{oc}$). Sistemin anahtarlama frekansı $T_s=10$ kHz olduğundan, bu değerler yardımı ile $(D.T_s)$ anahtarın iletimde olduğu süre ve $(1-D.T_s)$ anahtarın kesimde olduğu süre değerleri bulunur. Şekilde a ile ifade edilen değer PWM sinyalinin genliği $(D.T_s)$ değerinden büyük ise ($a>D.T_s$) bu durumda algoritma $D=D+dt$ adımını izlemiş, değil ise ($a<D.T_s$) durumun da ise algoritma $D=D-dt$ adımını izlemiş olur. Şekil 3.40.(b)'de bu durum gösterilmiştir.



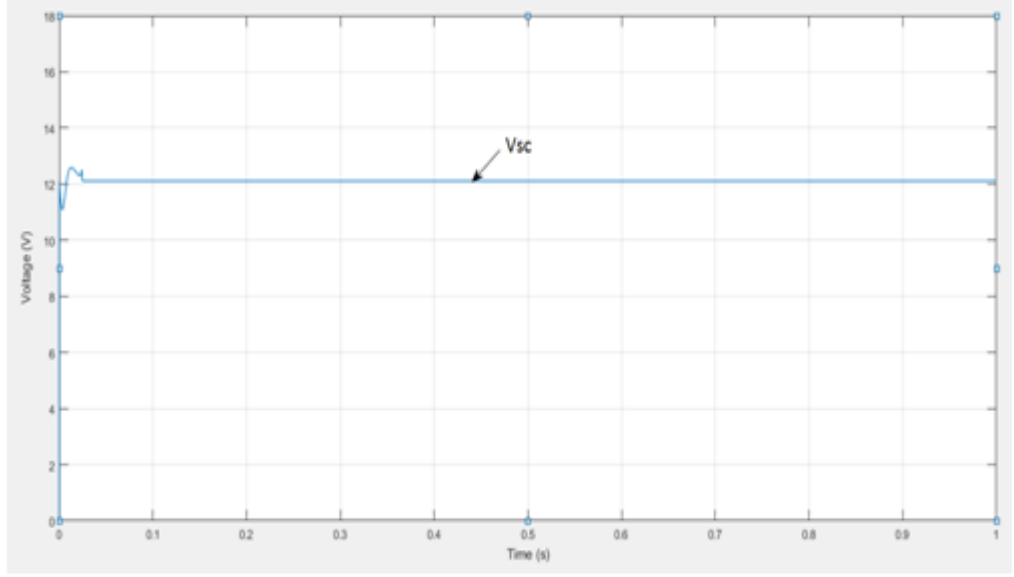
a)



b)

Şekil 3.40. a) MPPT kontrol devresi (duty cycle) çalışma döngüsü b) $D + dt$, $D - dt$ varyasyonları

Çıkış gerilimi, bu kontrol işleminin sonunda depolama ve batarya kısmına yönlendirilir. MPPT kontrol basamağından sonra depolama ünitesi üzerindeki gerilimin dalga formu şekil 3.41.'de gösterilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi V_{sc} çıkış gerilimi 0.025 saniye sonra kararlı bir çıkış şeklini alır.

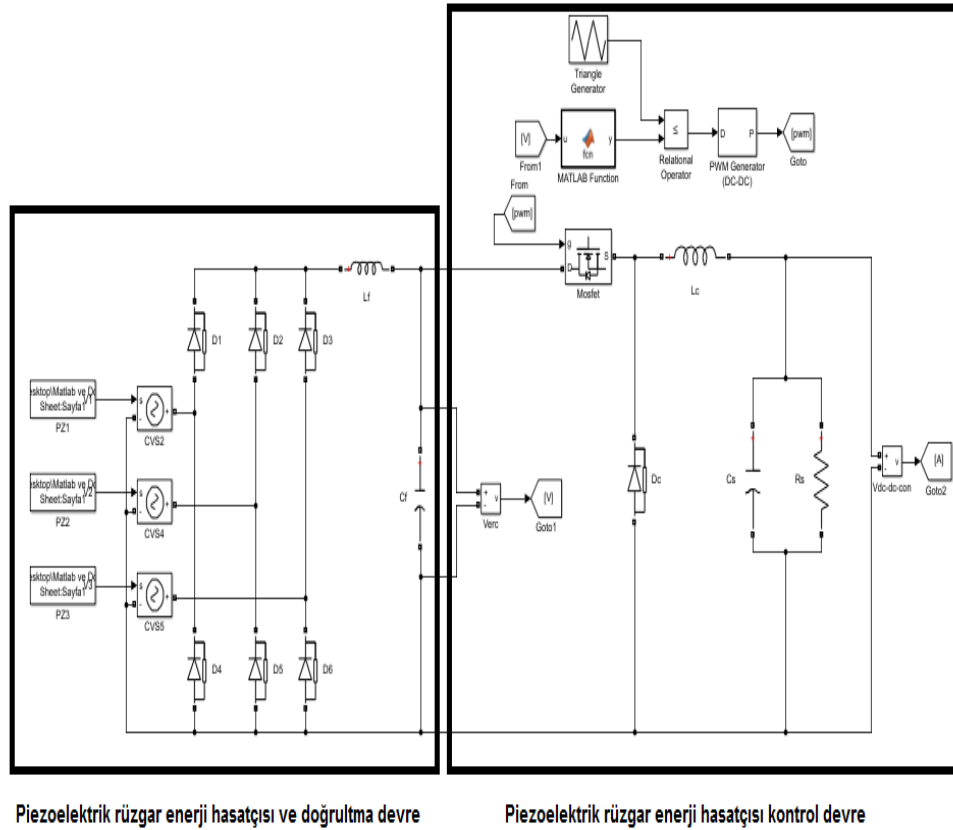


Şekil 3.41. MPPT kontrol devresinin çalışması sırasında V_{sc} çıkış gerilimi

Benzetim sonuçlarının sistematik olarak elde edilmesi için bir ölçüm kurulumu gereklidir. Çünkü çıkış yükündeki değişim, çıkış gücünü önemli ölçüde etkilemektedir. Şekil 3.42.'de piezoelektrik rüzgâr enerji hasat sisteminin verimi, maksimum gücün belirlenmesinden sonra teorik olarak da hesaplanabilir.

PWEH ve doğrultucu ünitesinin eşdeğer devresi gücünü P_{in} ile, PWEH ünitesi kontrol devresi gücünü de P_{out} ile ifade edersek burada verim çıkış gücünün giriş gücüne oranından bulunur. Denklem (3.3)'e göre maksimum güç kazancı oranını sağlar.

$$\eta_{MPPT} = (P_{out} / P_{in}) \times 100\% \quad (3.3)$$

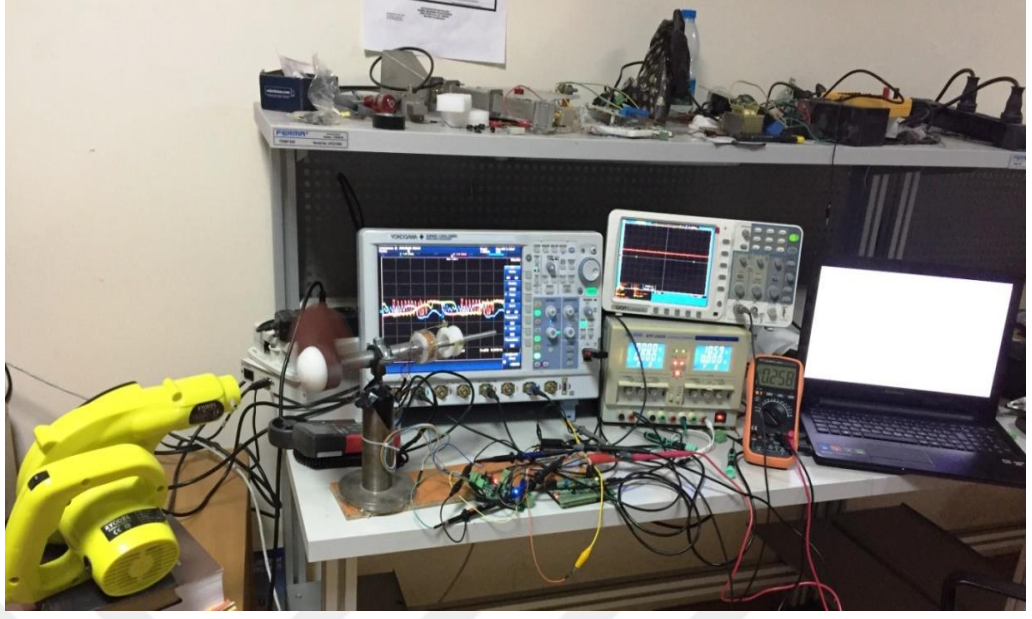


Şekil 3.42. Tasarlanan PWEH sistemin verim hesaplamasında kullanılan devre

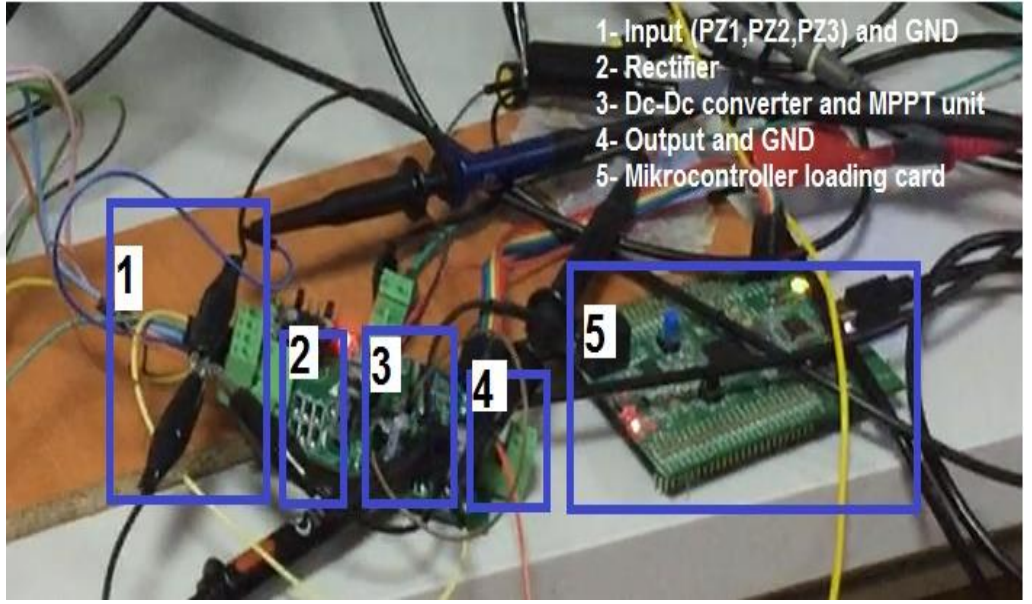
Benzetimi yapılan piezoelektrik rüzgâr enerji hasat sistemi piezoelektrik levhalardan alınan gerilim sinyallerinin çok fazla harmonik ve süper harmonik içermesi bu sistemin enerji verimliliğini çok düşürmektedir. Tasarlanan MPPT kontrol devresi yardımı ile bu sistemin benzetim sonuçlarına bakıldığında veriminin yükseltilebileceği açıktır.

3.2.2. Piezoelektrik rüzgâr enerji hasat sistemi tasarımı ve MPPT uygulaması

Tasarlanarak piezoelektrik rüzgâr enerji hasat (PWEH) sisteminin yapılan uygulaması Şekil 3.43.'te gösterilmiştir.



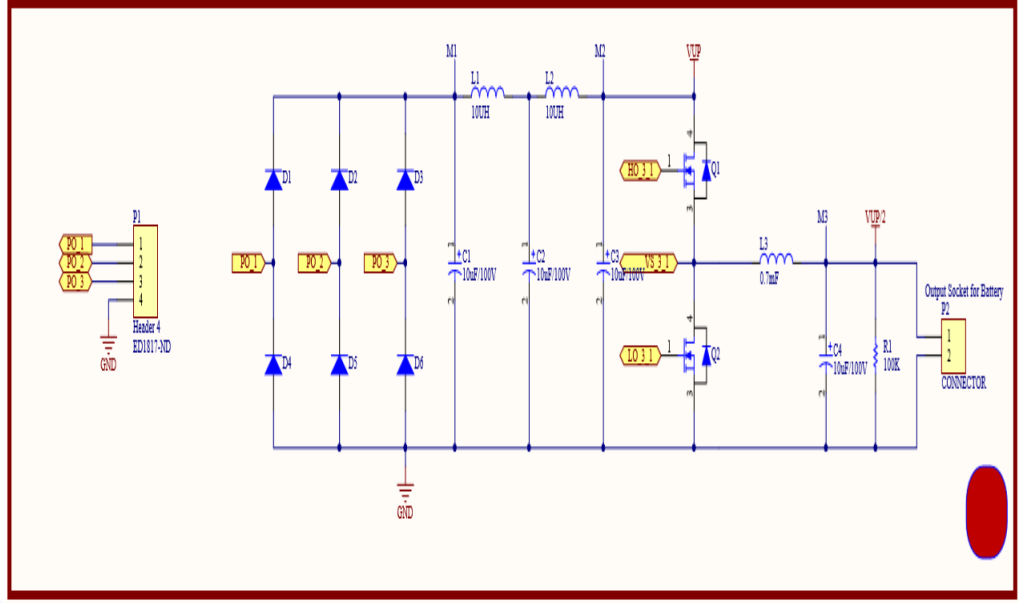
a)



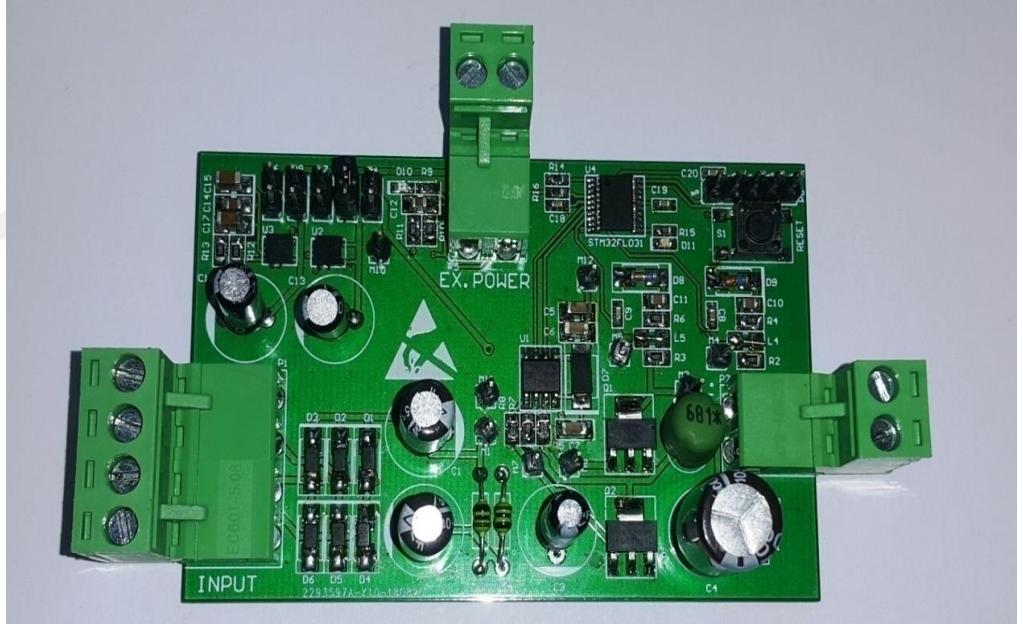
b)

Şekil 3.43. Tasarlanan piezoelektrik rüzgar enerji hasat sisteminin genel görünümü

Tasarlanan piezoelektrik rüzgâr enerji hasat (PWEH) sistemi piezoelektrik levhalardan gelen sinyallerin giriş olarak kabul edildiği, tam dalga doğrultmaç, filtre devresi, MPPT kontrol devresi, DC-DC dönüştürücü ve depolama ünitesinin tasarımı için kullanılan devre düzeneği Şekil 3.44.'te gösterildiği gibi 5cmx8cm ebatlarında üretilmiştir.



a)



b)

Şekil 3.44. Tasarlanan piezoelektrik rüzgar enerji hasat sistemi gerçek devresi (5cmx8cm)

Piezoelektrik rüzgar enerji hasat sistemi için uygulanan devrede 150V gerilime kadar çalışabilen 2 adet NCP781 entegresi kullanılmıştır. Bunlardan 1 tanesi işlemcinin ihtiyacı olan 3.3V gerilimi sağlaması diğeri ise işlemci tarafından kontrol edilen 12V mosfet sürücü beslemesi için kullanılmıştır.

Devrede harici olarak 12V besleme soketi konulmuştur. Soket kullanıldığı durumlarda besleme bölümü ayarlanabilir. Anahtarlama için mosfet sürücü olarak IRS21867 asenkron mosfet sürücü entegresi tercih edilmiştir. Mosfet olarak düşük anahtarlama kaybına sahip FQT7N10L entegresi tercih edilmiştir. Tasarlanan devrede mikrokontroller olarak çok düşük enerji tüketimine sahip STM32L031 serisi işlemci tercih edilmiştir. Burada anahtarlama kontrolü, gerilim ölçme ve 12V besleme entegresi kontrolünü gerçekleştirecektir.

Devrede düşük enerji tüketimi olması amacıyla entegre yerine gerilim bölücü tercih edilerek, işlemci tarafından okunacaktır. Devre yaklaşık olarak 5*8 cm boyutlarında üretimi gerçekleştirilmiştir. Ölçümleri kolaylaştırmak amacıyla 12 tane ölçüm ucu konulmuştur. Tüm elemanlar düşük güç tüketimine sahip olacak şekilde seçilmiştir. Devre kendi kendini besleyecek şekilde tasarlanmıştır. Anahtarlama ve kayıplar nedeniyle devre kendini besleyemez ise her ihtimale karşı harici besleme uçları bırakılmıştır.

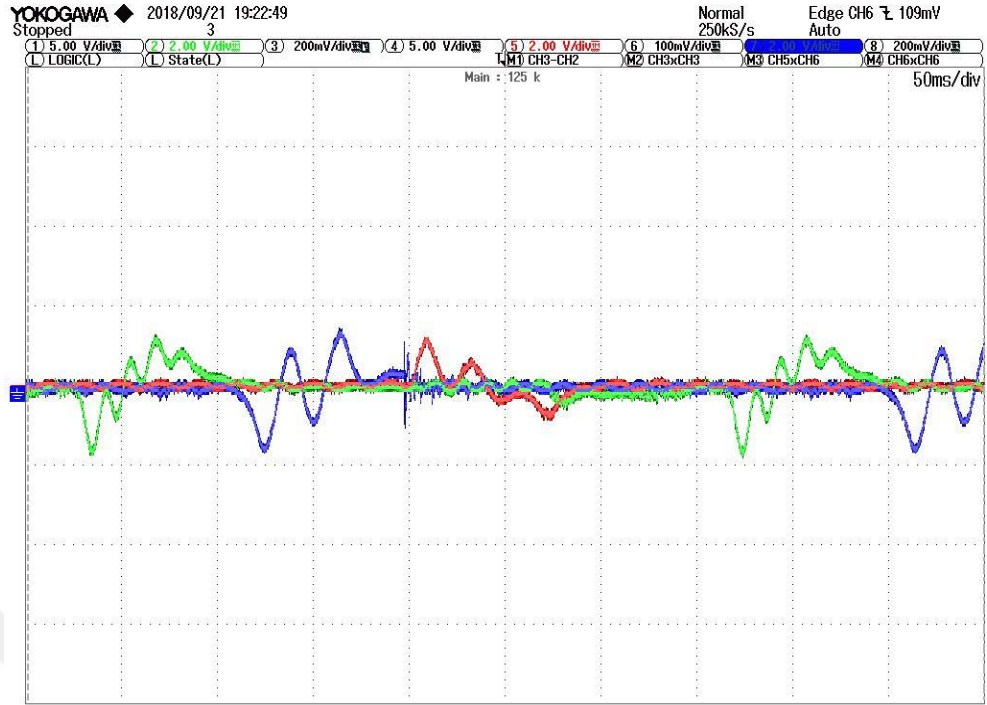
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. Piezoelektrik Rüzgâr Enerji Hasat (PWEH) Sistemin Gerçek Rüzgar Hızlarında Denenmesi

Tüm deneyler Şekil 3.44.'te gösterilen şekli ile gerçekleştirilmiştir. Devrede, piezoelektrik rüzgâr enerjisi toplayıcı, üç fazlı tam dalga köprü doğrultucu ve filtre, DC-DC dönüştürücü, depolama devresi ve batarya kullanılmıştır. Ek olarak, MPPT kontrol devresisistemin gücünün optimizasyonu için kullanılmıştır.

Birçok devre tasarımında (Kong ve Ha, 2012); (Büren ve Tröster, 2007), (Büren ve Tröster, 2007), (Mitcheson ve ark., 2004), (Demir, 2017) olduğu gibi, kondansatörün kapasitesi ve optimum yük direnci bu tür devrelerde sistemden maksimum güç elde edilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. PWEH'nin kontrol devresi Şekil 3.43. ve Şekil 3.44. 'deki gibi tasarlanmış ve uygulanmıştır.

Deneyler, değişen rüzgâr hızları için yapılmıştır. Sistem gerçek rüzgâr hızlarında deneylere tabi tutularak çalışması sağlanmıştır. Şekil 4.1.'de rüzgar tüneli sayesinde gerçek rüzgâr hızlarında piezoelektrik levhalardan alınan gerilim sinyallerinin osiloskop görüntüleri gösterilmiştir. Deneysel sonuçlara baktığımızda piezoelektrik levhalardan alınan gerilim sinyallerinin farklı frekanslarda ve değerlerde gerilimler ürettiklerini görmekteyiz. Sistem çeşitli rüzgâr hızlarında denendiğinde gerilim sinyallerinin benzetim görüntülerinde olduğu gibi birçok harmonik içerdiğini görmekteyiz.

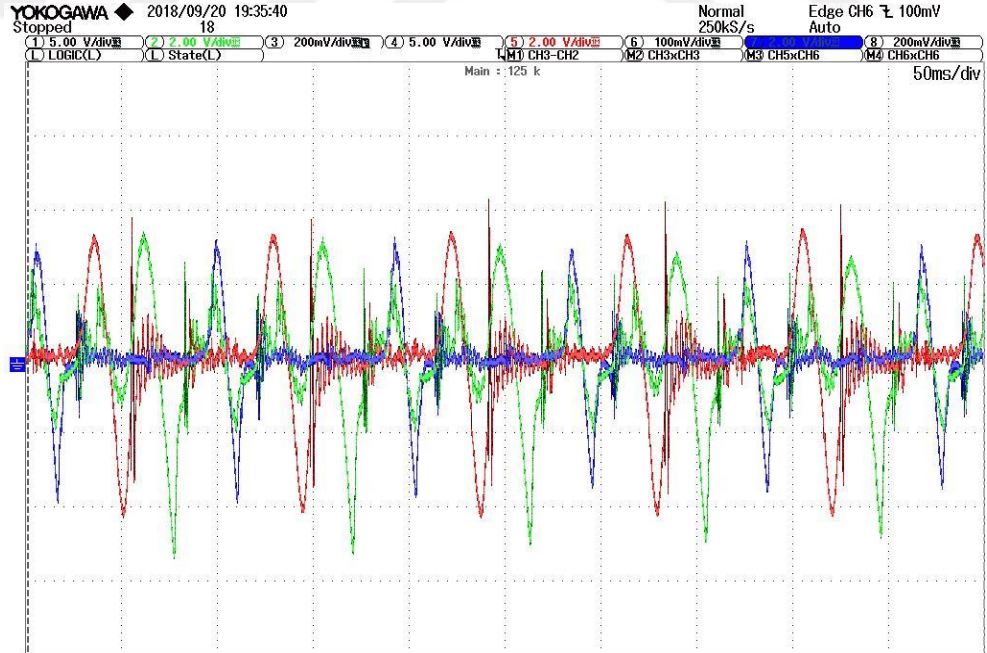


AvgFreq(C2) 2.949052 Hz

Mean(C5) -8.20082mV

Freq(C5) *****

Şekil 4.1. Rüzgar hızı $v=1.21$ m/sn, ve $m=2 \times 0.42=0.84$ gr. 2 kalıcı mıknatısın yerleştirilmesi ile elde edilen gerilim sinyalleri PZT-203 piezo malzeme kullanılmıştır

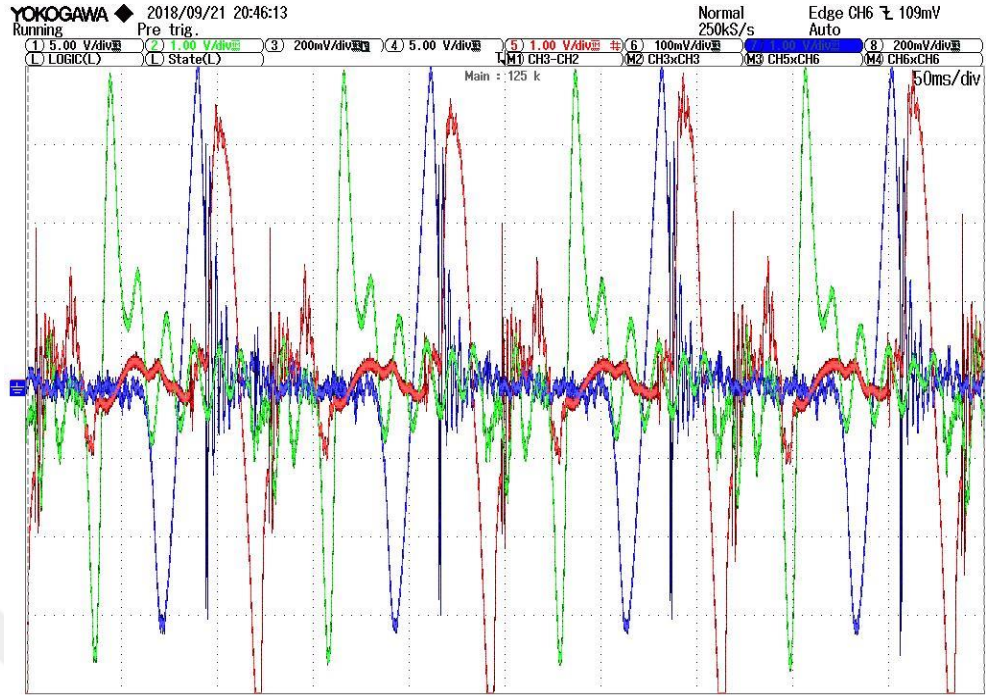


AvgFreq(C2) 11.84026 Hz

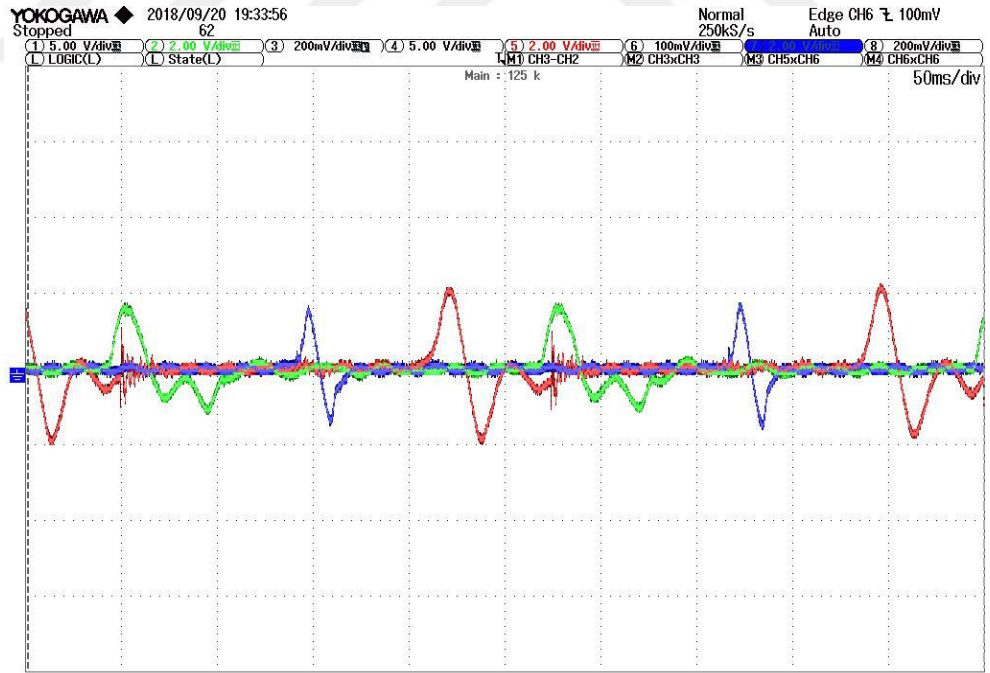
Mean(C5) 53.2914mV

Freq(C5) 81.19519 Hz

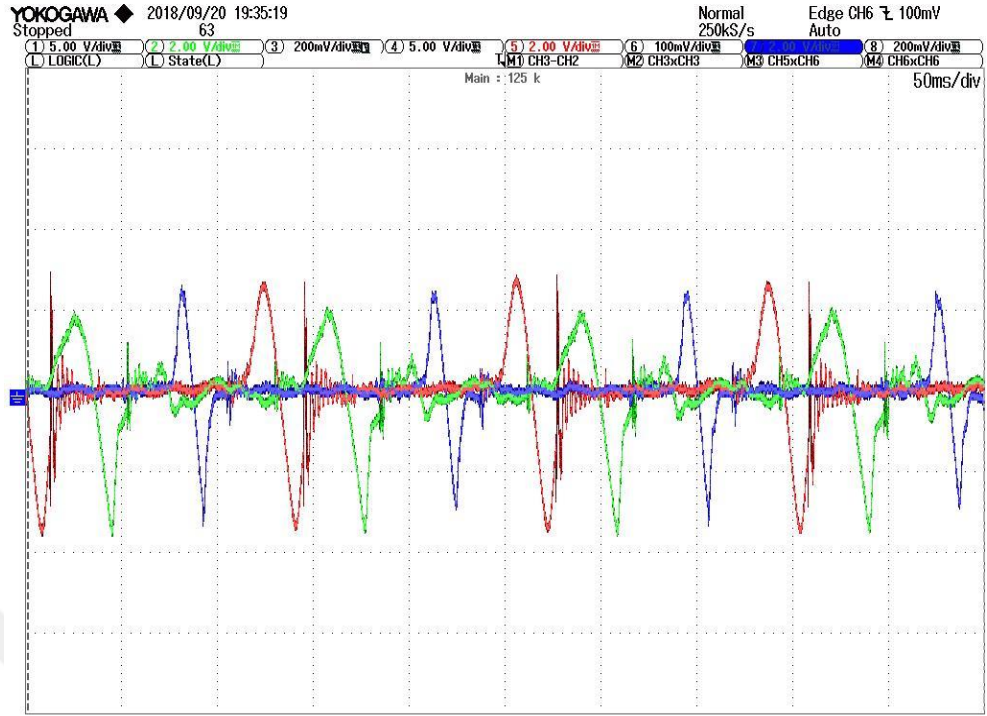
Şekil 4.2. Rüzgar hızı $v=2.91$ m/sn, ve $m=2 \times 0.42=0.84$ gr. 2 kalıcı mıknatısın yerleştirilmesi ile elde edilen gerilim sinyalleri PZT-203 piezo malzeme kullanılmıştır



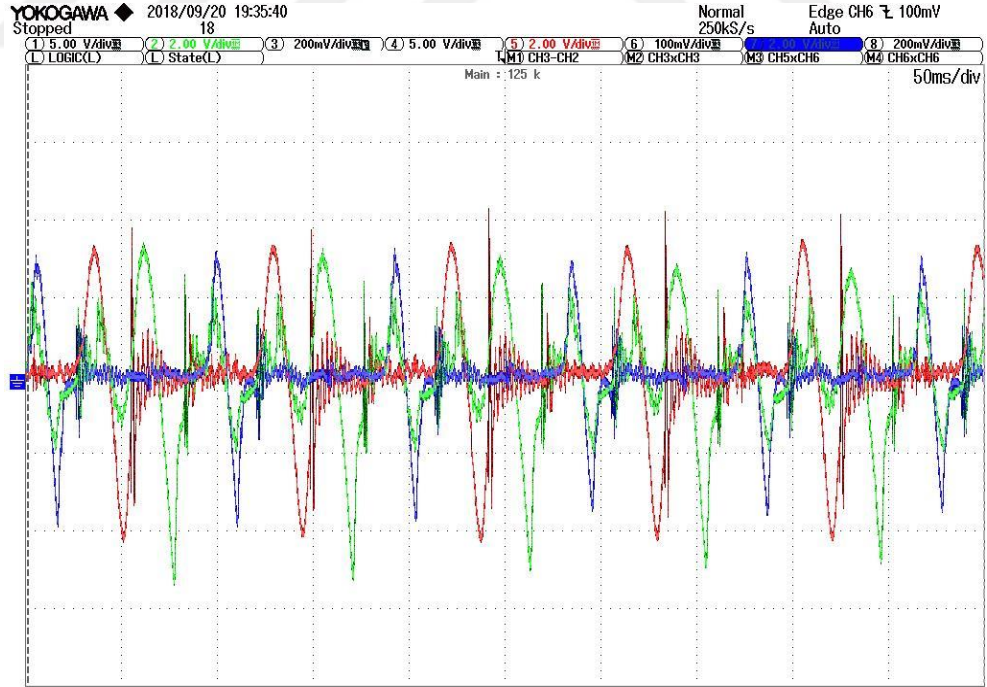
AvgFreq(C2) 7.969736 Hz Mean(C5) 45.4832mV Freq(C5) 7.935500 Hz
Şekil 4.3. Rüzgar hızı $v=3.81$ m/sn, ve $m=2 \times 0.42=0.84$ gr.2 kalıcı mıknatısın yerleştirilmesi ile elde edilen gerilim sinyalleri PZT-203 piezo malzeme kullanılmıştır



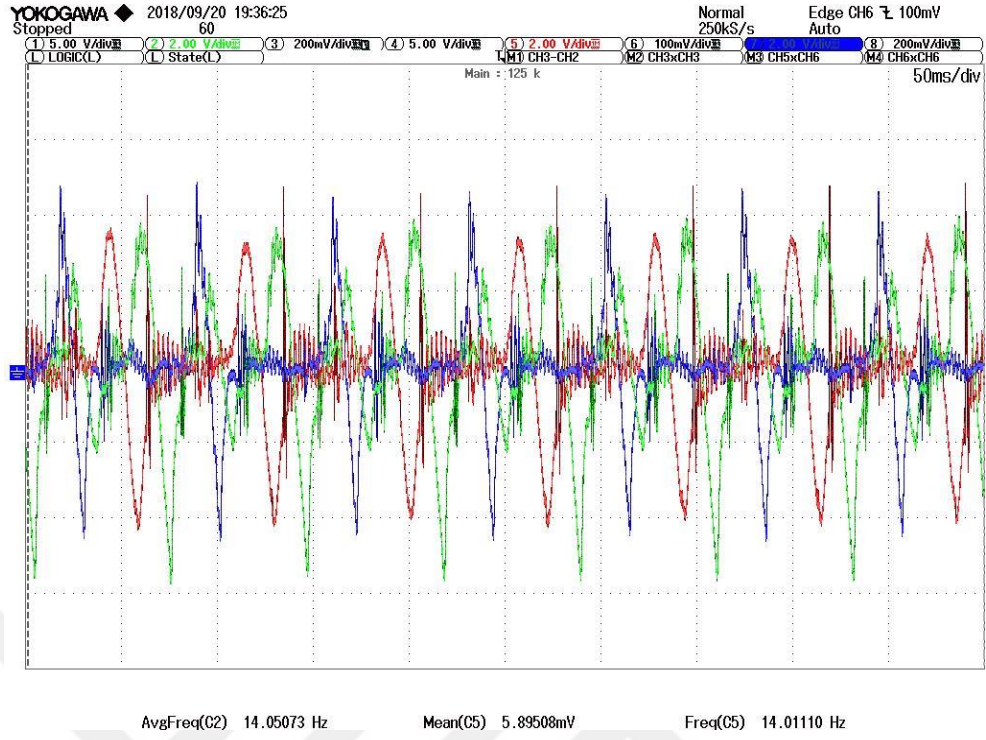
AvgFreq(C2) 4.432270 Hz Mean(C5) -47.1711mV Freq(C5) 50.77173 Hz
Şekil 4.4. Rüzgar hızı $v=1.21$ m/sn, ve $m=3 \times 0.42=1.26$ gr.3 kalıcı mıknatısın yerleştirilmesi ile elde edilen gerilim sinyalleri PZT-203 piezo malzeme kullanılmıştır



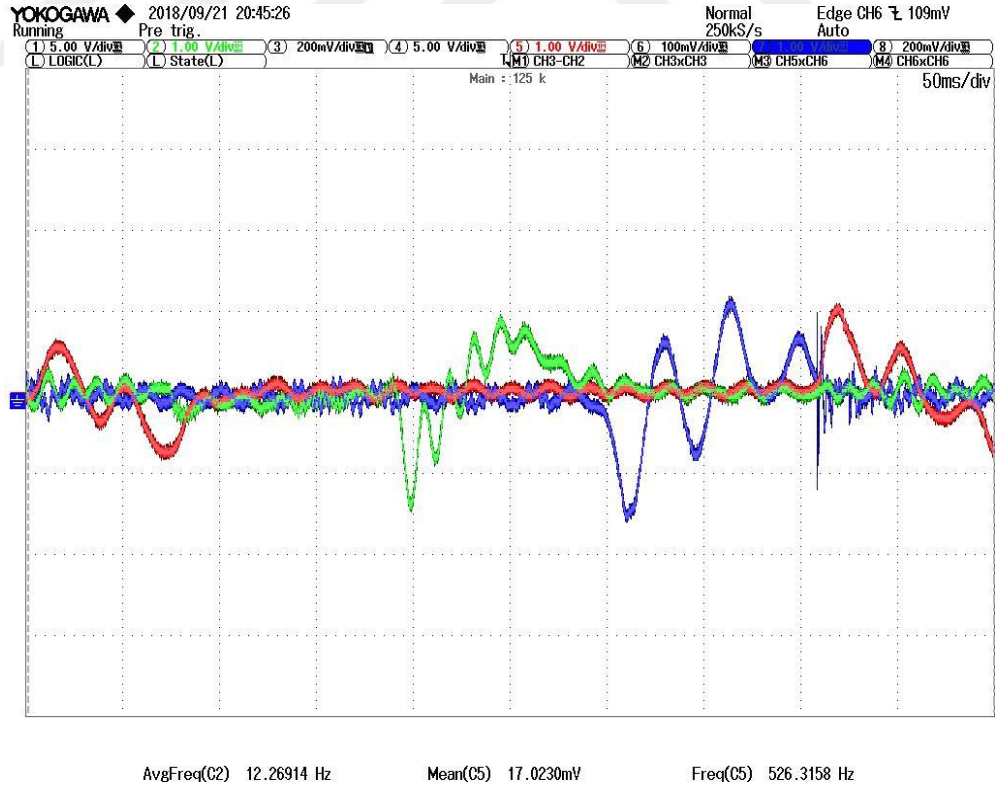
AvgFreq(C2) 9.744879 Hz Mean(C5) -55.1684mV Freq(C5) 7.553098 Hz
Şekil 4.5. Rüzgar hızı $v=2.23$ m/sn, ve $m=3 \times 0.42=1.26$ gr. 3 kalıcı mıknatısın yerleştirilmesi ile elde edilen gerilim sinyalleri PZT-203 piezo malzeme kullanılmıştır



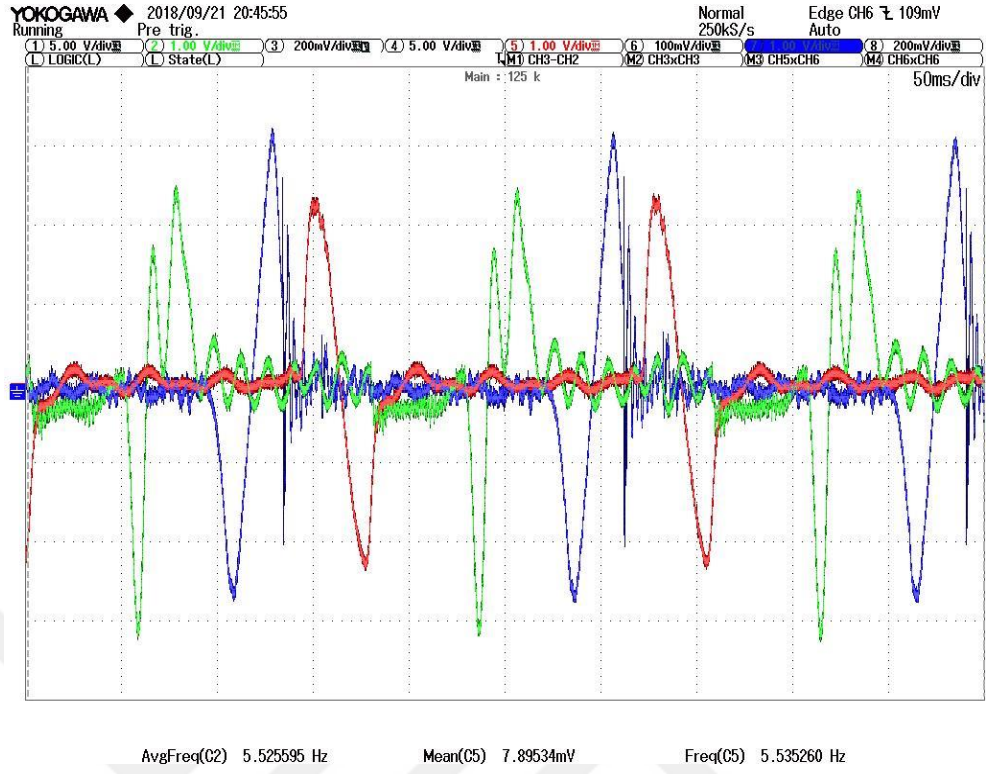
AvgFreq(C2) 11.84026 Hz Mean(C5) 53.2914mV Freq(C5) 81.19519 Hz
Şekil 4.6. Rüzgar hızı $v=2.91$ m/sn, ve $m=3 \times 0.42=1.26$ gr. 3 kalıcı mıknatısın yerleştirilmesi ile elde edilen gerilim sinyalleri PZT-203 piezo malzeme kullanılmıştır



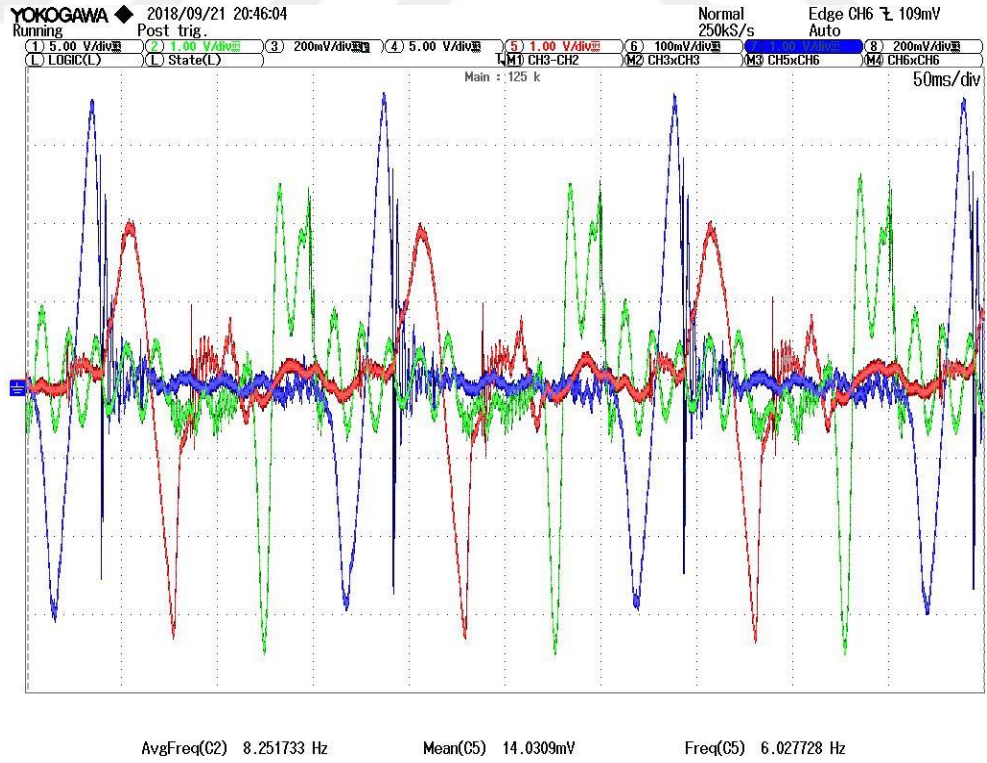
Şekil 4.7. Rüzgar hızı $v=3.81$ m/sn, ve $m=3 \times 0.42=1.26$ gr. 3 kalıcı mıknatısın yerleştirilmesi ile elde edilen gerilim sinyalleri PZT-203 piezo malzeme kullanılmıştır



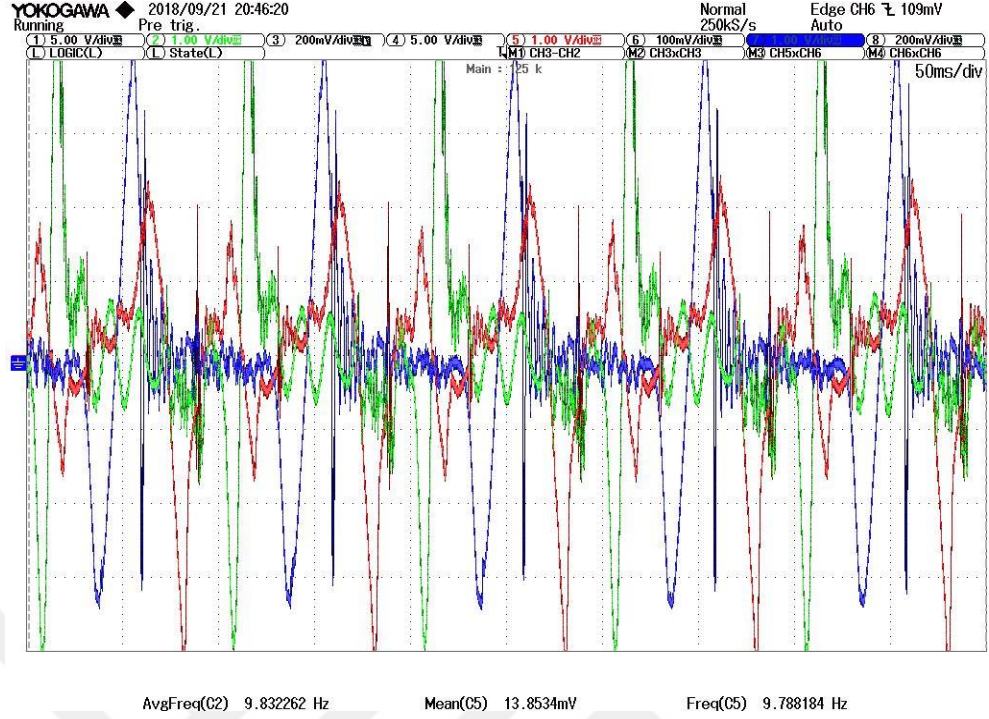
Şekil 4.8. Rüzgar hızı $v=1.21$ m/sn, ve $m=4 \times 0.42=1.68$ gr. 4 kalıcı mıknatısın yerleştirilmesi ile elde edilen gerilim sinyalleri PZT-203 piezo malzeme kullanılmıştır



Şekil 4.9. Rüzgar hızı $v=2.23$ m/sn, ve $m=4 \times 0.42=1.68$ gr. 4 kalıcı mıknatısın yerleştirilmesi ile elde edilen gerilim sinyalleri PZT-203 piezo malzeme kullanılmıştır



Şekil 4.10. Rüzgar hızı $v=2.91$ m/sn, ve $m=4 \times 0.42=1.68$ gr. 4 kalıcı mıknatısın yerleştirilmesi ile elde edilen gerilim sinyalleri PZT-203 piezo malzeme kullanılmıştır

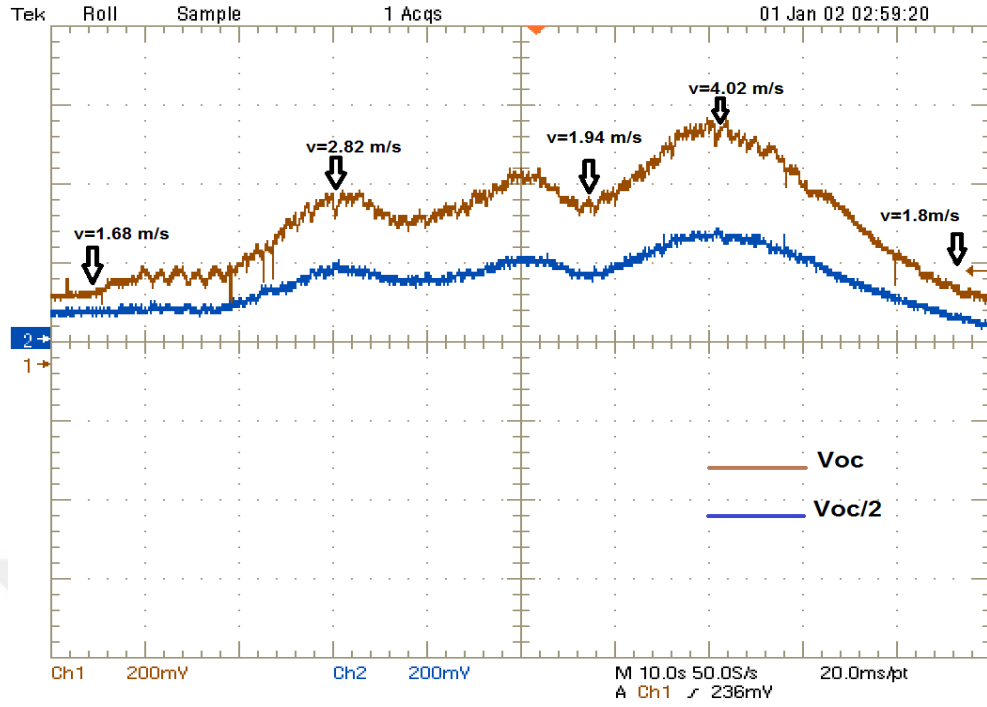


Şekil 4.11. Rüzgar hızı $v=3.81$ m/sn, ve $m=4 \times 0.42=1.68$ gr. 4 kalıcı mıknatıs yerleştirilmesi ile elde edilen gerilim sinyalleri PZT-203 piezo malzeme kullanılmıştır

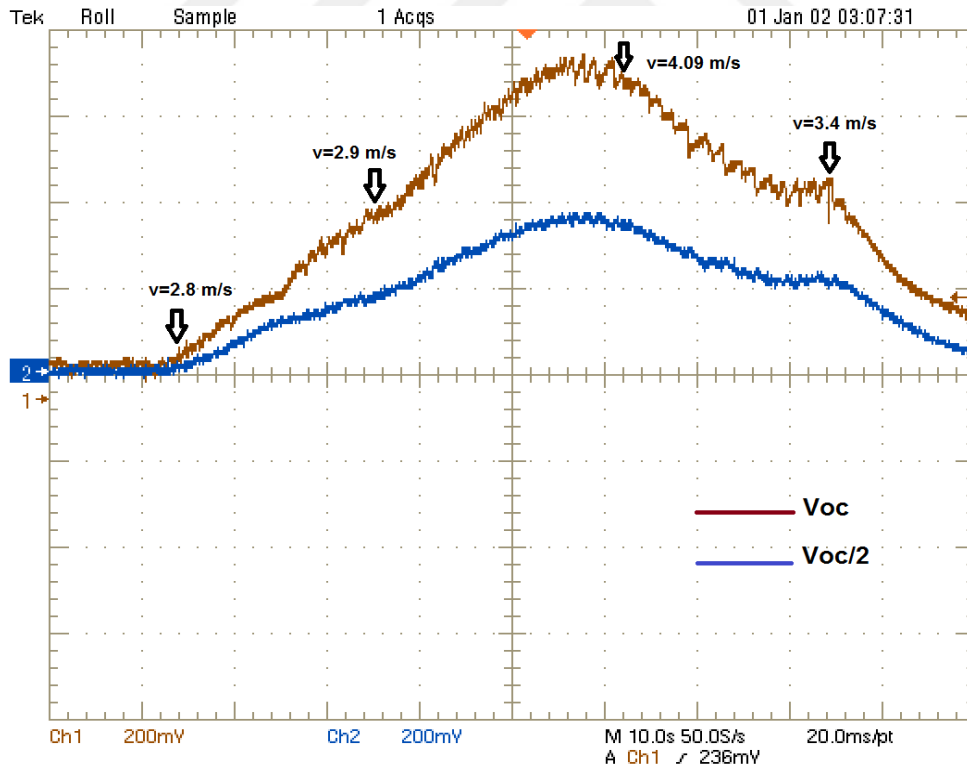
Gerçek rüzgar hızlarında deneysel olarak incelenen piezoelektrik hasat sisteminin maksimum güç noktası izleme yöntemi (MPPT) ile; mevcut durumda sistemin yüksek bir THD göstermesi, akım ve gerilim karakteristiklerinin doğrusal olmaması gibi nedenlerden dolayı düşük olan enerji üretimi verimini yükselteceği beklenmektedir.

4.2. Piezoelektrik Rüzgâr Enerji Hasat (PWEH) Sistemine Maksimum Güç Noktası İzleme (MPPT) Yönteminin Uygulanması

MPPT kontrol devresi piezoelektrik hasat sistemin açık devre gerilim değerinin yarısı $V_{oc}/2$ kritik değerinde maksimum güç üreteceği varsayılmıştır (Chew ve Zhu, 2018). Şekil 4.12.'de deneysel sonuçlar ve grafiklerde farklı rüzgar hızlarında çıkış yükünün $100 \text{ k}\Omega$ ile $1.2 \text{ k}\Omega$ olduğu durumlarda V_{oc} ve V_{sc} gösterilmiştir.



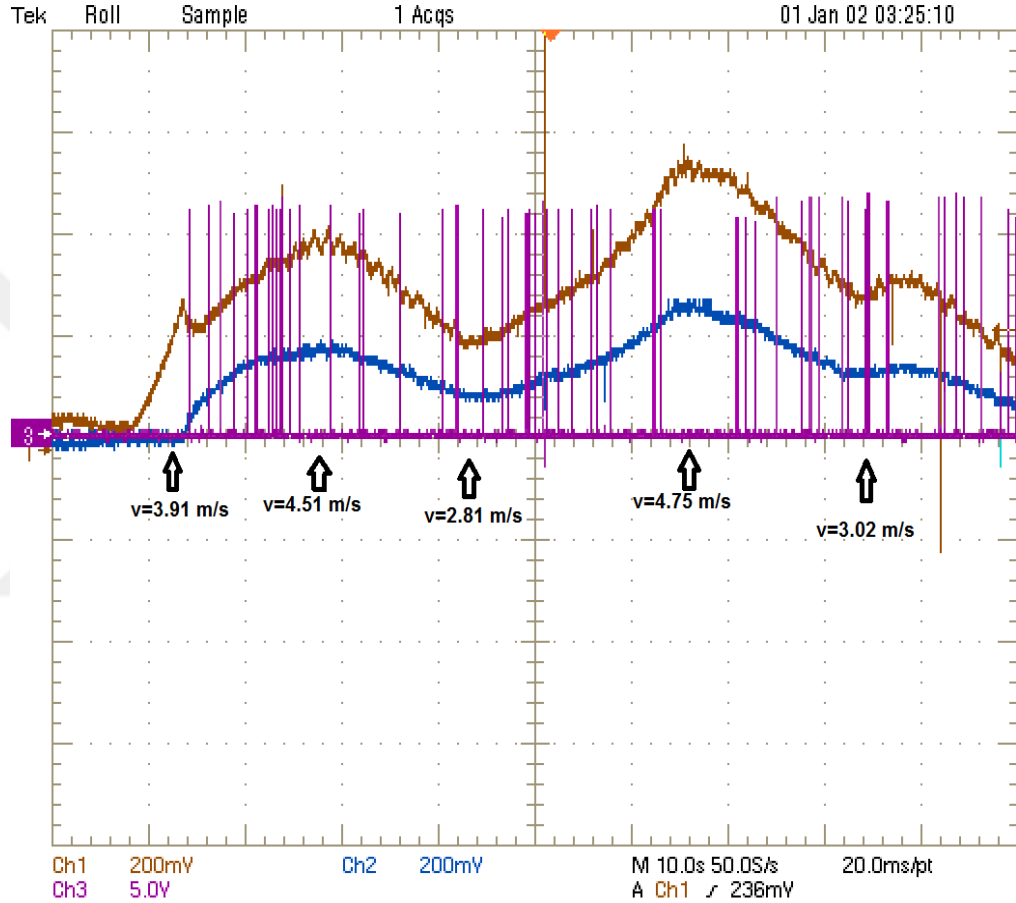
a)



b)

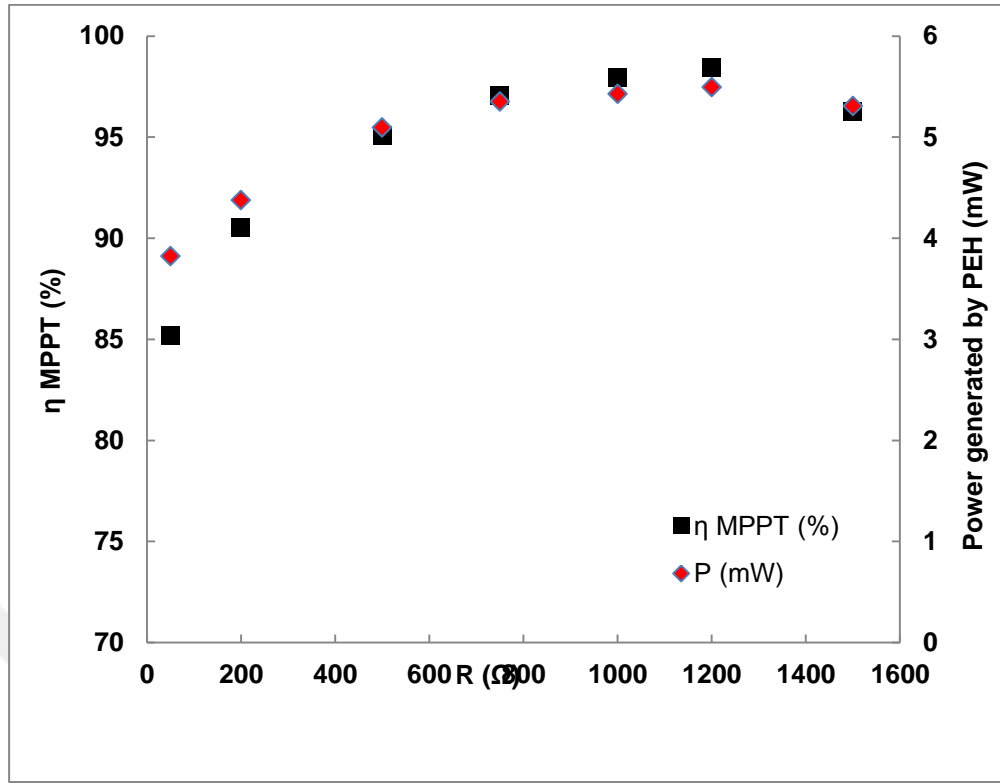
Şekil 4.12. Gerçek rüzgar hızlarında açık devre gerilimi V_{oc} ve V_{sc} a) $R_L=100 \text{ k}\Omega$, b) $R_L=1.2 \text{ k}\Omega$ PZT-203 piezo malzeme kullanılmıştır

Maksimum güç noktası (MPPT) açık devre voltajı ve beklenen maksimum güç noktası gerilimi, sırasıyla V_{oc} ve V_{sc} ile gösterilmiştir. Çıkış kondansatörü üzerindeki gerilim ve görev döngüsü (duty cycle) da sırasıyla V_{out} , $D=V_{out}/V_{oc}$ ile hesaplanmıştır. Sistemin maksimum güç transferi ve optimum güç noktasının belirlenmesi için görev döngüsü (duty cycle) değişimi Şekil 4.13.'te gösterilmiştir.



Şekil 4.13. Değişik rüzgar hızlarında görev döngüsü (duty cycle) gösterimi PZT-203 piezo malzeme kullanılmıştır

Maksimum güç aktarımı için çıkışta en uygun yük değeri bulunmalıdır. Deneyler sırasında 50Ω ile $1.5 \text{ k}\Omega$ arasındaki çeşitli elektrik yükleri test edilmiştir. Nitekim bizim tasarladığımız (PWEH) sistemi deneysel uygulamalardan sonra maksimum güç $1.2 \text{ k}\Omega$ 'da olacak şekilde tasarlanmıştır. Deneysel olarak çeşitli elektrik yük değerleri için sistemden hasat edilmiş güç değerleri ve buna karşılık sistemin verimi Şekil 4.14.'te gösterilmiştir.



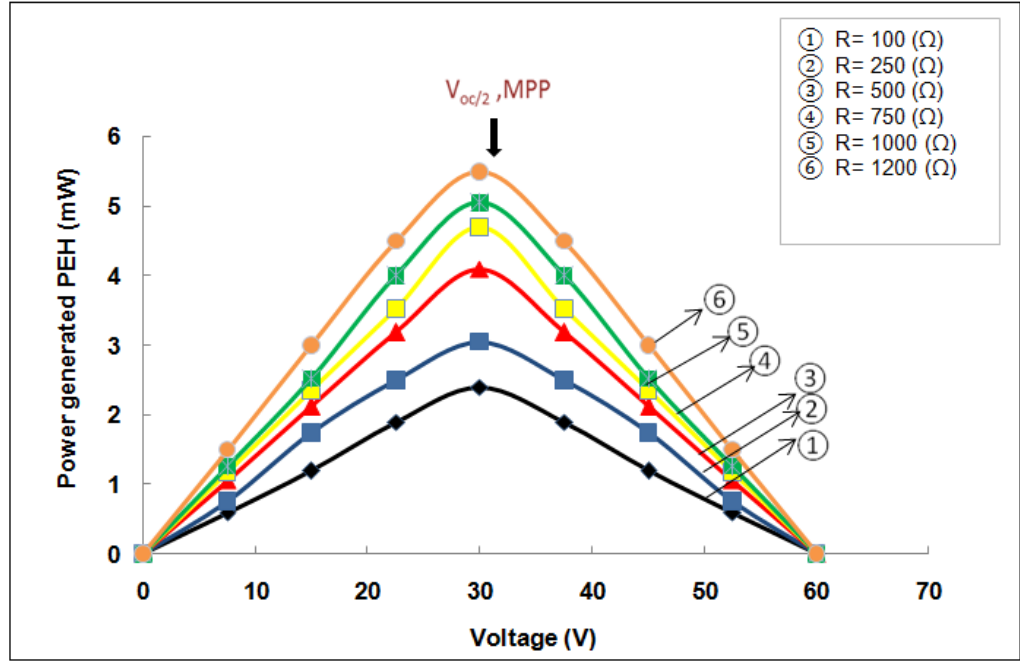
Şekil 4.14. Çeşitli çıkış yüklerinde hasat sisteminin güç ve verim grafiği PZT-203 piezo malzeme kullanılmıştır

Maksimum gücün, bu şekle göre optimal bir yükte elde edildiği açıktır. Empedansın yüke eşit olduğu durumda maksimum güç 5.6 mW olarak ölçülmüştür. Deneyleme göre, $V_{OC}/2$ değerine yakın değerlerde verim% 85 ile % 99 arasında değişmektedir. Deneysel sonuçlara göre piezoelektrik rüzgar enerji hasat sistemi güç değerleri 3.82 mW ile 5.49 mW arasında değişmektedir.

PWEH sisteminin %90'lık bir verimde çalışması, sistemin piezoelektrik bileşenlerinin enerji toplama kapasitesinin yüksek olduğu ve piezoelektrik rüzgar enerjisi hasatçımızın düşük güçlü elektronik cihazların çalıştırılmasında iyi bir çözüm olduğu anlamına gelmektedir.

Şekil 4.15.'te kondansatördeki gerilimin $V_{OC}/2$ değerlerine karşılık olarak maksimum güç noktası(MPP) eğrisini göstermektedir. Çeşitli yük değerleri için hasat sisteminin ürettiği güç değerleri beklendiği gibi farklı değerlerdir. Örneğin, düşük dirençlerin çıkış yükü olduğu durumda sistemin gücü 2-3 mW değerleri arasında

çıkarken, 1.2 kOhm gibi yüksek çıkış yüklerinde ise, önerilen MPP sisteminin katkısıyla sistemin çıkış gücü 5.7 mW değerine ulaşır. Ayrıca, kondansatör geriliminin yarısına yakın her durumda hasat sisteminden maksimum gücün alındığını görülmüştür.



Şekil 4.15. Farklı yük dirençleri için MPP tabanlı gerilim ve güç üretimi PZT-203 piezo malzeme kullanılmıştır.

Şekil 4.15'te gösterildiği gibi tasarlanan piezoelektrik rüzgar enerji hasatçısı sistemin kontrol devresi kısmında elde edilen gerilimlere göre deneysel güç eğrileri bulunabilir. Burada değişken çıkış yükleri sistemin MPP noktasını bulmak için ayarlanmıştır.

Güç eğrisi parabolige benzemektedir. Sistemde gerilim değerleri yüksek oranlarda $V_{OC}/2$ 'den uzak olması gücünün MPP noktasından biraz sapması anlamına gelmektedir. Gerilim değerleri eşik kritik değer olarak kullandığımız $V_{OC}/2$ 'den $\pm\%$ 20-30 gibi uzakta olsa bile MPP'de mevcut gücün % 90'ı hala elde edilebilir durumdadır. Burdan da anlaşılacağı gibi hasat sisteminden maksimum gücün geriliminin yarısına yakın hemen her durumda alındığını söyleyebiliriz.

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Tasarımı ve uygulaması gerçekleştirilen çalışmada ilk olarak, piezoelektrik malzemelerin yapısı, çeşitleri, bu malzemelerin hangi bileşenlerden oluştuğu ve bu malzemeler kullanılarak gerçekleştirilen farklı uygulamalar açıklanarak, piezoelektrik malzemelerin kullanılan diğer yenilenebilir ve alternatif bir temiz enerji üretim yöntemi olarak kullanılabileceğini göstermek amaçlanmıştır.

Çalışmanın daha sonraki bölümünde, tasarlama ve uygulama yapılmadan önce piezoelektrik rüzgar enerji hasat (PWEH) sistemi giriş verileri sistemden alınarak Matlab/Simulink programı kullanılarak sistemin benzetimi yapılmıştır. Sistem tüm detayları ve hesaplamaları burada en ince ayrıntısına kadar incelenmiştir. Sistemin uygulamasına geçilmeden önce tüm devrede düşük güç tüketen uygun elemanların seçilmesi, karakteristik özelliklerinin devreye uygunluğunun test edilmesi yapılmıştır. Burada amaç uygulama devresinin kusursuz çalışması ve gereksiz zaman kaybının önüne geçmektir. Benzetim ve daha sonrasında tasarımı gerçekleştirilen sistemin deneysel sonuçlarının karşılaştırılmasının yapılabilmesi açısından bu kısım büyük önem arz etmektedir. Çalışmanın son kısmında ise, daha önce benzetimi yapılan düşük güçte rüzgar enerjisi dönüşüm yöntemleri için yeni geliştirilen bir piezoelektrik rüzgar enerji hasat(PWEH) sistemi tasarlanmış ve uygulaması yapılmıştır. Hasat sisteminde enerji üretim kapasitesi olan piezoelektrik malzemelerden üretilen gerilimlerin dalga formlarıyüksek harmonik bozulmalara sahiptirler. Bu nedenle bu tasarlanan sistem için uygun bir güç optimizasyonu (MPPT) gereklidir. Yüksek harmonik değerleri ve sistemin akım gerilim değerlerinin doğrusal olmaması gibi nedenlerden dolayı mevcut sistemin enerji verimi çok düşük seviyelerdedir. Birçok piezoelektrik sistemlerin çalışması incelendiğinde maksimum gücün açık devre geriliminin yarısında elde edildiği görülmektedir(Elliott ve Mitcheson, 2014); (Naoki Kawai ve ark., 2015).

Yeni tasarladığımız ve uygulamasını yaptığımız piezoelektrik rüzgar enerji hasat (PWEH) sistemi teorik ve deneysel çalışmalarda açık devre gerilimin yarısı $V_{OC}/2$ kritik değerine dayalı olarak yapılmıştır. Tasarım ve uygulamada, piezoelektrik rüzgar enerji hasat sistemi piezoelektrik levhalardan üretilen sinyaller bir tam dalga köprü tipi doğrultucu ile düzeltilmiş ve daha sonra maksimum güç üretimi için $V_{OC}/2$ şarj geriliminin kullanılacağı bir kondansatör içine depolanmıştır.

Gerçekleştirilen piezoelektrik hasat sisteminde kontrol devresi mikrowatt seviyelerinde çok düşük bir güç tüketmektedir. Bu nedenle, sistem düşük güçlü hasat sistemleri için idealdir. Deneysel uygulamaya göre çıkış terminallerinden 5.7 mW'a kadar güç elde edilmiştir. PWEH sistemi için önerilen MPPT kontrol ünitesi ile çok düşük güç tüketimi sayesinde %98,41 gibi güç verimliliği ile çalışan bir sistemdir. Literatüre göre, piezoelektrik hasat sistemlerinde kontrol ünitesi için çeşitli ve çok karmaşık sistemler ve devrelerin kullanıldığı birçok çalışma var, ancak güç tüketimi bu tür karmaşık devrelerin ana sorundur.

Piezoelektrik rüzgar enerji hasat sistemi deneysel uygulamamıza göre, güç tüketimi sadece 5.29 μ W'dir. Benzer yöntemler kapsamında yapılan diğer çalışmalarla karşılaştırıldığında bu iyi bir değerdir. Tasarlanan piezoelektrik rüzgar enerji hasatçısı için üretilen ana devrenin kendisi çok küçük ebatlara (5 cm x 8 cm) sahiptir. Aynı zamanda tasarlanan sistemin kompakt özelliği ile düşük güç gerektiren her yere yerleştirilmesine de olanak sağlar.

5.2. Öneriler

Tasarlanan ve uygulaması yapılan çalışmanın bir sonraki aşamasında, farklı ebatlarda piezoelektrik malzemeler kullanılarak daha yüksek gerilimler üretilerek sistem çalıştırılabilir. Tasarlanan sistemin giriş sinyalleri piezoelektrik levhaların ürettiği gerilimlere göre çalışmaktadır. Bu şekilde, eğilme yada bükülme miktarı ve dolayısıyla da ürettikleri gerilim seviyeleri farklı piezoelektrik malzemeler kullanılarak sistem çalıştırılabilir.

Çalışmada kullanılan enerji depolama yerine herhangi bir sensör noktasının tükettiği enerjinin tamamını ya da bir kısmını karşılayacak şekilde devre tasarlanabilir. Devrenin küçük abatlarda olması onun başka bir sistemin alt parçası olacak şekilde çalışmasına olanak sağlar.



KAYNAKLAR

- ADHIKARI, S., FRISWELL, MI. and INMAN, DJ., 2009. Piezoelectric energy harvesting from broadband random vibrations. *Smart Mater Struct*, 18:115005.
- ALI, W.G. and NAGIB, G., 2012. Design Considerations for Piezoelectric Energy Harvesting Systems, International Engineering and Technology Conference (ICET), Pakistan, 1-6.
- AMIRTHARAJAH, R. and CHANDRAKASAN, A.P., 1998. Self-powered signal processing using vibration-based power generation *IEEE J. Solid State Circuits*, 33 (5): 687-695
- BALLAS, R.G., 2007. Piezoelectric Multilayer Beam Bending Actuators, 1st ed., Fujita, H., Liepmann, D., Springer, New York, 18 (21): 24-25.
- BALLATO, A., 1996. Piezoelectricity: history and new thrusts, *Ultrasonics Symposium*, San Antoino, 575-583.
- BIANCHINI, E., SPANGLER, R. and ANDRUS, C., The use of piezoelectric devices to control snowboard vibrations, *Proceedings of the SPIE*, 3329: 106 114 (1998).
- BORNO, RT. 2008. Transpiration as a Mechanism for Mechanical and Electrical Energy Conversion.
- BRYANT, M. ve GARCÍA, E., 2011. Modeling and testing of a novel aeroelastic flutter energy harvester. *J Vib Acoust* 133:011010.
- BÜREN, T. and TRÖSTER, G., 2007. Design and Optimization of a linear vibration driven electromagnetic micro-power generator, *Sensors Actuators A*, 135(2): 765-775.
- CEVIK, G., AKSIT, M.F. SABANOVIC, A., 2011. Piezoelectric wind power harnessing - an overview. In: 10th int. Conf. on sustainable energy tech, Istanbul, Turkey; p. 1e9.
- CHAOJIE, C., FEI, X., WEI-JIN, H. and LAIN-JONG L., 2018. Two-dimensional materials with piezoelectric and ferroelectric functionalities *npj 2D Materials and Applications*, 2:18.
- CHEW, Z. J. and ZHU, M., 2018. Adaptive maximum power point finding using direct VOC/2 tracking method with microwatt power consumption for energy harvesting, *IEEE Trans. Power Electr.* 33 (9):8164-8173.
- CHOI, W.J., JEON, Y., JEONG, J.H., SOOD, R. and KIM, S.G., 2006. Energy harvesting MEMS devices based on thin film piezoelectric cantilevers, *Journal of Electroceramics* 17(2-4): 543-548.
- CHUNSHENG, Z., 2011. *Ultrasonic motors: technologies and applications*, Springer Science and Business Media, New York, 22-23.
- COOK-CHENNAULT, K.A., THAMBI, N. and SASTRY, A.M., 2008. Powering MEMS portable devices – a review of non-regenerative and regenerative power supply systems with emphasis on piezoelectric energy harvesting systems, *Smart Materials and Structures*, 17 (4): 043001
- D220-A4-103YB <http://www.piezo.com/catalog8.pdf%20files/Cat8.49.pdf>; 2011.
- DU TOIT NE., 2005. Modeling and design of a MEMS piezoelectric vibration energy harvester. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology.

- ELLIOTT, A.D.T. and MITCHESON, P.D., 2014. Piezoelectric energy harvester interface with realtime MPPT, *J. Phys.: Conf. Ser.* 557 012125.
- ERTURK, A., 2009. Electromechanical modeling of piezoelectric energy harvesters, PhD Thesis, Virginia Tech. University, 225-226.
- FRISWELLA, MI. and ADHIKARI, S., 2010. Sensor shape design for piezoelectric cantilever beams to harvest vibration energy. *J Appl Phys*, 108:014901.
- FU, H. and YEATMAN, EM., 2015. A miniaturized piezoelectric turbine with self regulation for increased air speed range. *Appl Phys Lett*, 107:243905.
- GHERCA, R. and OLARU, R., 2011. Harvesting vibration energy by electromagnetic induction: *Annals of the University of Craiova, Craiova. Electr Eng Ser*;35:7-2.
- GIURGIUTIU, V. and LYSHEVSKI, S.E., 2009. Micromechatronics modeling, analysis, and design with MATLAB, 2nd ed., Taylor and Francis, Florida, 390-393.
- GLYNNE-JONES, P., TUDOR, M.J., BEEBY, S.P. and WHITE, N.M., 2004. An electromagnetic vibration-powered generator for intelligent sensor systems, *Sensors and Actuators A*, 110 (1): 344-349.
- GU, Y., CLARK, R.L., FULLER, C.R. and ZANDER, A. C., 1994. Experiments on active control of plate vibration using piezoelectric actuators and polyvinylidene fluoride (PVDF) modal sensors, *Journal of Vibration and Acoustic*, 116 (3):303-308.
- HANDE, A., POLK, T., WALKER, W. and BHATIA, D., 2007. Indoor solar energy harvesting for sensor network router nodes, *Microprocessors and Microsystems*, 31(6):420-432.
- HARIS F.H., 2013. Syed Idris Syed Hassan, Rosemizi Abd Rahim, Acoustic Energy Harvesting Using Piezoelectric Generator for Low Frequency Sound Waves Energy Conversion December International Journal of Engineering and Technology IJET13 05-06-118 (Vol 5 No 6):4702
- HARNE, RL. and WANG, KW., 2013. A review of the recent research on vibration energy harvesting via bistable systems. *Smart Mater Struct*, 22:23001.
- HÄSLER, E., STEIN, L. and HARBAUER, G., 1984. Implantable physiological power supply with PVDF film, *Ferroelectrics*, 60(1):277-282.
- HEGEWALD, T., 2010. Vibration suppression using smart materials in the presence of temperature changes, Master Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, 8-11.
- HEYWANG, W., LUBITZ, K. and WERSING, W. 2008. Piezoelectricity: Evolution and Future of a Technology, Springer Series in Materials Science, Springer London.
- HILLENBRAND J. and SESSLER G. M., 2004. High-sensitivity piezoelectric microphones based on stacked cellular polymer films (L), *Journal of the Acoustical Society of America*, 116 (6): 3267-3270.
- HOSSEINABADI, NR., TABESH, A., DEGHANI, R. and AGHILI, A., 2015. An efficient piezoelectric windmill topology for energy harvesting from low speed air flows. *IEEE Trans Ind Electron* 62:3576e83.
- JOON KIM, K., COTTONE, F., GOYAL, S. and PUNCH, J., 2010. Energy scavenging for energy efficiency in networks and applications. *Bell Labs Tech J*, 15(2):7-29.

- JOON KİM, K., COTTONE, F., GOYAL, S. and PUNCH, J., 2010. Energy scavenging for energy efficiency in networks and applications. *Bell Labs Tech J*, 15(2):7–29.
- KARAMİ, MA. and INMAN DJ., 2012. Powering pacemakers from heartbeat vibrations using linear and nonlinear energy harvesters. *Appl Phys Lett* 2012;100:042901.
- KHBEİS, M., MCGEE, J. and GHODSSI, R., 2009. Development of a simplified hybrid ambient low frequency, low intensity vibration energy scavenger, *Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference*, Denver, 525-528.
- KONG, L. B., Lİ, T., HNG, H. H., BOEY, F., ZHANG, T. and Lİ, S., 2004. Piezoelectric effect, *Waste Energy Harvesting*, Springer, Berlin, 19-133.
- KONG, N. AND HA, D.S., 2012. Low-power design of a self-powered piezoelectric energy harvesting system with maximum power point tracking, *IEEE Transaction on Power Electronics*, 27(5): 2298-2308
- KORKMAZ, Z., 2015. MEMS teknikleri kullanarak esnek piezoelektrik dokunsal algılayıcı dizini üretimi, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Ankara, 15-26.
- KURT, E. and UZUN, Y., 2017. Nonlinear problems in piezoelectric harvesters under magnetic field, in: *Energy Harvesting and Energy Efficiency*, Springer.
- KURT, E., COTTONE, F., UZUN, Y., ORFEİ, F., MATTARELLİ, M. And OZHAN, . D. 2017. Design and implementation of a new contactless triple piezoelectrics wind energy harvester, *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(28): 17813-17822
- LAKE, J., LUAN, J., TANAKA, Z., LIANG, B. and CHEN, B., 2011. Piezoelectric materials and devices for wind energy harvesting. *Mater Res Soc Symp Proc*, 1325.
- Lİ, S. and LİPSON, H., 2009. Vertical-stalk flapping-leaf generator for parallel wind energy harvesting. In: *Proc of the ASME/AIAA conf on smart materials, adaptive structures and intelligent syst*, California, USA; p. 611e9.
- MARCO, B., LUIGİ C., ALESSANDRO, LS. and MASSİMO, V., 2018. Optimization of both Perturb & Observe and Open Circuit Voltage MPPT Techniques for Resonant Piezoelectric Vibration Harvesters feeding bridge rectifiers *Sensors and Actuators A* 278:85–97.
- MEİTZLER, A., TIERSTEN, H., WARNER, A., BERLINCOURT, D., COUQİN, G. and WELSH F. 1988. III, *IEEE Stand Piezoelectri*.
- MİNAZARA, E., VASİC, D. and COSTA, F., 2008. Piezoelectric generator harvesting bike vibration energy to supply portable devices. In: *Int conf renewable energies and power quality*, Santander, Spain; p. 1e6.
- MİTCHESON, P., MİAO, P., START, B., YEATMAN, E., HOLMES, A. and GREEN, T., 2004. MEMS electrostatic micro-power generator for low frequency operation, *Sensors and Actuators A*, 115 (2): 523-529.
- MİTCHESON, P.D., GREEN, T.C., YEATMAN, E.M. and HOLMES, A.S., 2007. Power Processing Circuits for Electromagnetic, Electrostatic and Piezoelectric Inertial Energy Scavengers, *Microsystem Technologies*, 13:1629-1635.
- MOHEİMANİ A.J. and REZA, S.O., 2006. *Fleming, Piezoelectric Transducers for Vibration Control and Damping*. Springer-Verlag London.

- MOHEİMANİ, SR. and FLEMİNG, A.J., 2006. Fundamentals of piezoelectricity. *Piezoelectric Transducers Vib Control Damping*, 9-35.
- MYERS, R., VİCKERS, M., KİM, H. and PRIYA, S., 2014. Small scale windmill. *Appl Phys Lett*, 90(5):54106.
- NAOKİ, K., YUKİTO, K. and HİROTAKA, K., 2015. MPPT Controlled Piezoelectric Energy Harvesting Circuit Using Synchronized Switch Harvesting on Inductor, IECON-41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 9-12 Nov. 2015, Yokohama, Japan.
- ORTİZ, J., ZABALA, N., MONJE, P. M., COKONAJ, V. and ARANGUREN, G., 2013. Energy generation based on piezoelectric transducers., *International Conference on Renewable Energies and Power Quality*, Spain, 11.
- OTTOMAN, G.K., HOFMANN, H.F., BHATT, A.C. and LESİEUTRE, G.A., 2002. Adaptive piezoelectric energy harvesting circuit for wireless remote power supply, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 17(5): 669-676.
- PATEL, İ. and UZUN, M., 2011. The Requirement for piezoelectric smart material for current and future applications, *Sigma, Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 29 (4): 395-411.
- PONGALİUR, K., MUTKA, M.W. and Lİ, X., 2009. Energy balancing hopping sensor network model to maximize coverage, 18th International Conference on Computer Communications and Networks, San Francisco, California, 1-6.
- PRIYA, S., CHEN, C., FYE, D. and ZAHND, J., 2005. Piezoelectric windmill: a novel solution to remote sensing. *Jpn J Appl Phys*, 44:L104e7.
- QUİN-HUA Q., 2013. *Advances in materials and mechanics*, 1st ed., Springer, Berlin, 8-20.
- RADOUSKY, HB. and LIANG, H., 2001. Energy harvesting: an integrated view of materials, devices and applications. *Nanotechnology*, 23:502001.
- RAMSEY, M. J. and CLARK, W. W., 2001. Piezoelectric energy harvesting for bio MEMS applications, *8th Annual Smart Materials and Structures Conference*, Newport Beach, CA, 429-438.
- ROUNDY, S. and WRİGHT, P.K., 2004. A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics, *Smart Materials and Structures*, 13(5):1131.
- ROUNDY, S., WRİGHT, PK, and RABAEY, JM., 2003. *Energy scavenging for wireless sensor networks*. Springer/Kluwer Academic Publishers.
- ROUNDY, S., WRİGHT, PK. and PİSTER, KS., 2002. Micro-electrostatic vibration to-electricity converters. In: ASME 2002 international mechanical engineering congress and exposition. American Society of Mechanical Engineers. 2002.
- ROUNDY, SJ., 2003. *Energy scavenging for wireless sensor nodes with a focus on vibration to electricity conversion*. Berkeley: University of California.
- SEVGİ, H. E., 2009. Piezoelektrik yamalı katmanlı kompozit bir kirişin titreşim analizi ve kontrolü, *Doktora Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 10-50.
- SODANO, H.A., INMAN, D.J. and PARK, G., 2004. A review of power harvesting from vibration using piezoelectric materials, *The Shock and Vibration Digest*, 36(3): 197-205.
- SODANO, H.A., INMAN, D.J. and PARK, G., 2005. Comparison of Piezoelectric Energy Harvesting Devices for Recharging Batteries, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 16(10):799-807.

- SONG, Y., YANG, CH., HONG, SK., HWANG, SJ., KİM, JH. and CHOİ, JY., 2016. Road energy harvester designed as a macro-power source using the piezoelectric effect. *J Hydrogen Energy*, 41:12563.
- TABESH, A. and FRÉCHETTE, L.G., 2010. A low-power stand-alone adaptive circuit for harvesting energy from a piezoelectric micropower generator, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 57 (3):840-849.
- TANI, J. and TAKOGI, T., 1998. Intelligent materials system: application of functional material systems: application of functional materials, *Applied Mechanics Reviews*, 51: 505-505.
- TORAH, R.N., TUDOR, M.J., PATEL, K., GARCIA, I.N. and BEEBY, S.E., 2007. Autonomous low power microsystem powered by vibration harvesting, *IEEE Sensors'07, Atlanta*, 264-267.
- TRESSLER, J.F., ALKOY, S. and NEWNHAM, R. E., 1998. Piezoelectric Sensors and Sensor Materials, *Journal of Electroceramics*, 2(4): 257-272.
- TÜRKER, Ö., 2009. Pzt/polimer esaslı aktif titreşim kontrolüne uygun akıllı kırıntı tasarımı ve imalatı, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 10-32.
- UCHINO, K., 2000. *Ferroelectric Devices*, 1st ed., Marcel Dekker, New York, 152-157.
- UZUN, Y. and KURT, E., 2013. Performance exploration of an energy harvester near the varying magnetic field of an operating induction motor. *Energ Convers Manag* 72:156e62.
- XU WANG, A., 2019. study of harvested power and energy harvesting efficiency using frequency response analyses of power variables *Mechanical Systems and Signal Processing*, 133-1.
- XUAN-DIEN, D., SEOK-KYUN, H. and ANDSANG-G., 2014. Optimization of Piezoelectric Energy Harvesting Systems by Using a MPPT Method 2014 IEEE Fifth International Conference on Communications and Electronics (ICCE) 30 July-1 Aug. 2014, Danang, Vietnam.
- YUN, S-N., HAM, Y-B. and PARK, J-H., 2009. Energy harvester using PZT actuator with cantilever. In: *ICCAS-SICE*, Fukuoka, Japan; 5514e7.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı :Davut ÖZHAN
Uyruğu :T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi :Gercüş/Batman/1980
Telefon :0(544) 855 10 00
Faks :0(482) 213 40 02
e-mail :davutozhan@artuklu.edu.tr

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	:Mardin Teknik ve End. Meslek Lisesi	1997
Üniversite	:Gazi Üniversitesi Elektrik Öğretmenliği	2002
Yüksek Lisans	: Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enst.	2005
Doktora	:Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enst.	2019

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2005-2007	Gazi Üniversitesi Atatürk MYO	Öğr.Gör.
2007-2010	Hacettepe Ün. Polatlı MYO	Öğr.Gör.
2010-2019	Mardin Artuklu Ün. Mardin MYO	Öğr.Gör.

UZMANLIK ALANI

Yenilenebilir enerji, Piezoelektrik enerji üretim sistemleri, Güç elektroniği

YABANCI DİL

İngilizce ÜDS: 60

Yayımlar

KURT, E., COTTONE, F.,UZUN, Y., ORFEİ, F., MATTARELLİ, M. and OZHAN, D., 2017 Design and implementation of a new contactless triple piezoelectrics wind energy harvester, *International Journal of Hydrogen Energy*, 42 (28), 17813-17822. (Doktora Tezi).

OZHAN, D., UNAL, F., KURT, E. and TASALITIN, R., 2017. Design and Modelling of a Triple Wind Energy Harvester With a Variable Capacitance, *V. European Conference on Renewable Energy Systems*. (Özet Bildiri/Poster)(Yayın No:3666485) (Doktora Tezi).