

**T.C.  
ISPARTA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE VE İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**PIEZOELEKTRİK MALZEME KULLANARAK DENİZ  
DALGASI ENERJİSİNDEN ELEKTRİK ÜRETEBİLEN  
SİSTEMİN TASARIMI VE İMALATI**

**Eftal DURGUN**

**Danışman  
Dr. Öğr. Üyesi Ömer KARABIYIK**

**ISPARTA - 2020**



© 2020 [Eftal DURGUN]

## TEZ ONAYI

### **PİEZOELEKTRİK MALZEME KULLANARAK DENİZ DALGASI ENERJİSİNDEN ELEKTRİK ÜRETEBİLEN SİSTEMİN TASARIMI VE İMALATI**

Eftal DURGUN tarafından hazırlanan bu tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine ve İmalat Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman** Dr. Öğr. Üyesi Ömer KARABIYIK  
Süleyman Demirel Üniversitesi

**İmza**  


**Üye** Dr. Öğr. Üyesi Kubilay TAŞDELEN  
Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi



**Üye** Doç. Dr. Gültekin BASMACI  
Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi



Yukarıdaki Jüri kararı Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ..../..../....  
tarih ve ...../..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

**Prof. Dr. Yusuf UÇAR**  
Enstitü Müdürü

## ETİK BEYANI

Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak ve bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yol ve yardıma başvurmaksızın hazırladığım bu tez çalışmasında;

Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde ve ortaya çıkan sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, tezime ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara katlanacağımı bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

05/03/2020

**Eftal DURGUN**



## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
İÇİNDEKİLER .....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT.....	iii
TEŞEKKÜR.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	v
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	viii
1. GİRİŞ .....	1
1.1. Dalga Enerjisi.....	4
1.2. Dalga Enerjisinin Avantajları.....	7
1.3. Dalga Enerjisinin Dezavantajları .....	7
1.4. Dalga Enerjisinin Tarihsel Gelişimi.....	8
1.5. Türkiye’de Dalga Enerjisi Potansiyeli .....	10
1.6. Dalga Enerjisi Hesabı.....	13
1.7. Dalga Enerjisinin Elektrığe Dönüşmesi.....	14
1.8. Dalga Enerjisi Toplama Cihazları.....	15
1.8.1. Dalga profil cihazları.....	16
1.8.2. Salınımlı su sütunu cihazları (OWC, Oscillating Water Colum Device).....	19
1.8.3. Dalga yakalama cihazları .....	21
1.9. Piezoelektrik Etki .....	23
1.10. Piezoelektriksel Davranış ve Türleri.....	25
1.10.1. Doğru piezoelektriksel davranış.....	26
1.11. Piezoelektrik Malzemeler.....	27
1.11.1. PZT seramik (Kurşun zirkonat titanat) .....	28
1.11.2. Davul tipi piezoelektrik malzemeler .....	28
1.12. Piezoelektriğin Kullanım Alanları .....	29
2. KAYNAK ÖZETLERİ.....	35
3. İMALATI YAPILAN PIEZOELEKTRİK ENERJİ HASAT SİSTEMİ .....	52
3.1. Elektriksel Bağlantılar ve Kontrol Sistemi .....	56
3.1.1. Arduino Uno özellikleri .....	57
4. BULGULAR VE TARTIŞMA .....	60
4.1. Hasat Sisteminin Güç Yoğunluğu Hesabı ve Diğer Sistemler ile Karşılaştırılması .....	65
4.2. Piezoelektrik Hasat Sisteminin Yatırım Maliyeti .....	67
5. SONUÇ VE ÖNERİLER .....	70
KAYNAKLAR .....	73
ÖZGEÇMİŞ.....	78

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### PIEZOELEKTRİK MALZEME KULLANARAK DENİZ DALGASI ENERJİSİNDEN ELEKTRİK ÜRETEBİLEN SİSTEMİN TASARIMI VE İMALATI

Eftal DURGUN

Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
Makine ve İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ömer KARABIYIK

Dalga enerjisi potansiyeli yüksek yenilenebilir enerji kaynaklarından. Bu çalışmada deniz dalgasının kinetik enerjisini elektrik enerjisine dönüştürebilen bir sistemin tasarımı ve imalatı gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan şamandıralı sistem ile sığ sulardaki dalga yüksekliği ve dalga periyodunun değişiminin elektrik üretimi üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Projede elektrik üretici olarak piezoelektrik malzemeler kullanılmıştır. Şamandıranın salınım hareketinden oluşan kinetik enerji, piezoelektrikler aracılığı ile elektrik enerjisine dönüştürülmüştür. Arduino uno ile oluşturulan düzenek ile gerilim, akım ve güç ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçümler sığ denizde 3 gün 10'ar saatlik üç ayrı zaman diliminde yapılmıştır.

Arduino uno ile elde edilen veriler yardımıyla piezoelektrik hasat sistemimizin verimi ve birim maliyeti hesaplanmıştır. Tasarladığımız hasat sistemi ile literatürde bulunan benzer piezoelektrik hasat sistemlerinin verimleri güç yoğunluğu bakımından kıyaslanmıştır. Sonuçta benzer çalışmalara göre yaklaşık %300 daha fazla güç elde edebildiği görülmüştür. Dalga yüksekliğinin ve periyodunun sistem üzerinde önemli etkisinin olduğu, dalga yüksekliğinin ortalama 20 cm altında olduğu şartlarda güç elde edilmediği görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Piezoelektrik, Dalga enerjisi, Dalga gücü, Güç yoğunluğu, Maliyet hesabı, Arduino.

2020, 78 sayfa

## **ABSTRACT**

**M.Sc. Thesis**

### **DESIGN AND MANUFACTURING OF ELECTRIC GENERATING SYSTEM FROM MARINE WAVE ENERGY USING PIEZOELECTRIC MATERIALS**

**Eftal DURGUN**

**Isparta University of Applied Sciences  
The Institute of Graduate Education  
Department of Mechanical and Manufacturing Engineering**

**Supervisor: Asst. Prof. Dr. Ömer KARABIYIK**

Wave energy is one of the high potential renewable energy sources. In this study, the design and manufacture of a system that can convert the kinetic energy of the sea wave into electrical energy has been carried out. With the designed float system, the effects of the wave height in the shallow water and change of the wave period on electricity generation were examined.

Piezoelectric materials were used as electricity generators in the project. The kinetic energy formed by the oscillating motion of the float has been converted into electrical energy through piezoelectrics. Voltage, current and power measurements were made with the device created with Arduino uno. Measurements were taken in shallow sea for 3 days and 10 hours in three different time periods.

With the help of the data obtained with Arduino uno, the efficiency and unit cost of our piezoelectric harvest system was calculated. The efficiency of the harvesting system we designed and the similar piezoelectric harvesting systems in the literature were compared in terms of power density. As a result, it was seen that approximately 300% more power can be obtained compared to similar studies. It has been observed that the wave height and period have an important effect on the system, and the power cannot be obtained under conditions where the wave height is below 20 cm.

**Key Words:** Piezoelectric, Wave energy, Wave power, Power density, Cost calculation, Arduino.

**2020, 78 pages**

## **TEŞEKKÜR**

Bu araştırma için beni ynlendiren, karşılaştığım zorlukları bilgi ve tecrübesi ile aşmamda yardımcı olan Danışman Hocam Dr. Öğr. Üyesi Ömer KARABIYIK'a teőekkürlerimi sunarım.

Projemin elektrik ile ilgili olan bölümlerinde bana yardımcı olan Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği bölümünün değerli đretim üyelerine teőekkürlerimi sunarım.

Tezimin her aşamasında beni yalnız bırakmayan aileme sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

**Eftal DURGUN**  
ISPARTA, 2020





## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Şekil 1.1. Dalgaların sınıflandırılması .....	5
Şekil 1.2. Kinetik ve potansiyel enerji .....	6
Şekil 1.3. Asgari dalga enerji seviyeleri.....	10
Şekil 1.4. Azami dalga enerji seviyeleri.....	10
Şekil 1.5. Karadeniz DEĞİ değerleri .....	12
Şekil 1.6. Akdeniz DEĞİ değerleri .....	12
Şekil 1.7. Marmara Denizi DEĞİ değerleri .....	12
Şekil 1.8. Ege Denizi DEĞİ değerleri .....	12
Şekil 1.9. Dalga profil cihazları yapısı-1 .....	16
Şekil 1.10. Dalga profil cihazları yapısı-2 .....	17
Şekil 1.11. Dalga profil cihazları yapısı-3 .....	18
Şekil 1.12. Pelamis örneği.....	18
Şekil 1.13. Salınlımlı su sütunu cihazları yapısı .....	19
Şekil 1.14. OWC'nin alternatif yapısı .....	20
Şekil 1.15. Üst üste gelen dalga dönüştürücü .....	22
Şekil 1.16. Piezoelektrik olay kutuplaşması .....	24
Şekil 1.17. Piezoelektrik malzemenin sıkıştırılması .....	26
Şekil 1.18. PZT Seramik .....	28
Şekil 1.19. Davul tipi piezoelektrik .....	29
Şekil 1.20. Mini WASP UAV ve Akıllı Yapı .....	30
Şekil 1.21. Yapısal sağlık kontrolü sistemi.....	31
Şekil 1.22. Piezoelektrik malzemelerin sonar sisteminde kullanımı.....	31
Şekil 1.23. Sırt çantası için tasarlanan piezoelektrik enerji hasatı sistemi.....	32
Şekil 1.24. Karayollarındaki uygulamalar .....	32
Şekil 1.25. Piezoelektrik malzemenin demiryollarındaki uygulamaları .....	33
Şekil 1.26. Piezoelektrik etkiden yararlanılarak rüzgardan elektrik üretimi görseli .....	33
Şekil 2.1. Piezoelektrik malzemeler ile okyanus dalgası enerji dönüşümü .....	35
Şekil 2.2. Ağırıklı, esnek piezoelektrik elemanlar ile elektrik enerjisi üretimi.....	36
Şekil 2.3. Piezoelektrik jeneratör korumalı sistem tasarımı.....	37
Şekil 2.4. Enerji toplayıcı sıg su simülatörüne monte edilmiş görüntüsü .....	41
Şekil 2.5. Disk piezoelektrik dalga üretici dönüştürücü sistemi .....	41
Şekil 2.6. Ağır hareket için demirleme yapılandırmaları .....	42
Şekil 2.7. Deniz yüzeyi hareketi için yapılandırmaları bağlama .....	43
Şekil 2.8. Enerji hasat makinesinin kurulması .....	45
Şekil 2.9. Önerilen enerji dönüştürücüsünün şeması .....	46
Şekil 2.10. Piezoelektrik enerji toplayıcısının şematik diyagramı .....	47
Şekil 2.11. Şamandıralı sistem görseli .....	48
Şekil 2.12. FPED yapısı .....	49
Şekil 2.13. FPED test düzeneği görseli.....	50
Şekil 2.14. Piezoelektrik enerji hasat cihazı ve çalışma biçimi .....	51
Şekil 2.15. Piezoelektrik tabanlı şamandıranın şematik görüntüsü.....	51
Şekil 3.1. Piezoelektrik malzemeli enerji hasat sisteminin gövdesinin teknik resmi .....	52

Şekil 3.2. İmal edilen sistemin yapısı ve çalışma prensibi.....	53
Şekil 3.3. Piezoelektrik enerji hasat sistemi.....	54
Şekil 3.4. Davul tipi piezoelektrik malzemelerin yerleşimi ve kablolanması.....	55
Şekil 3.5. Halat sarma sistemi.....	55
Şekil 3.6. Piezoelektrik malzemelerin paralel bağlantı devre şeması.....	56
Şekil 3.7. Arduino kart üzerinde bulunan elemanların tanıtımı.....	57
Şekil 3.8. Arduino bağlantı şeması.....	58
Şekil 3.9. Arduino kart bağlantısı.....	59
Şekil 4.1. Piezoelektrik hasat sisteminin deniz ortamında test edilmesi.....	60
Şekil 4.2. Piezoelektrik hasat sisteminin 08:00-12:00 saat diliminde ölçülen gerilim değerleri.....	61
Şekil 4.3. Piezoelektrik hasat sisteminin 12:00-15:30 saat diliminde ölçülen gerilim değerleri.....	62
Şekil 4.4. Piezoelektrik hasat sisteminin 12:00-15:30 saat diliminde ölçülen akım değerleri.....	62
Şekil 4.5. Piezoelektrik hasat sisteminin 12:00-15:30 saat diliminde ölçülen güç değerleri.....	62
Şekil 4.6. Piezoelektrik hasat sistemden saat 16:00'dan sonra elde edilen gerilim değerleri.....	63
Şekil 4.7. Piezoelektrik hasat sistemden saat 16:00'dan sonra elde edilen akım değerleri.....	63
Şekil 4.8. Piezoelektrik hasat sistemden saat 16:00'dan sonra elde edilen güç değerleri.....	64
Şekil 4.9. Akdeniz sahili dalga yüksekliği haritası.....	65

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Çizelge 1.1. Ülkelerin 2017 yılsonu yenilenebilir elektrik kurulu güç kapasitesi.....	2
Çizelge 1.2. Güneş enerjisi, rüzgar enerjisi ve dalga enerjisinin kW/m <sup>2</sup> başına enerji üretim miktarı .....	3
Çizelge 1.3. Karadeniz, Akdeniz ve okyanuslardaki dalga yüksekliği ve dalga gücü .....	4
Çizelge 4.1. Meteoroloji Genel Müdürlüğünün Akdeniz kıyısı için fırtına, hava, rüzgar, dalga ve görüş verileri .....	65
Çizelge 4.2. Dalga yüksekliğinin zaman dilimlerindeki değişimine göre dalga enerjisi ve piezoelektriklerin güç yoğunlukları.....	66
Çizelge 4.3. Çeşitli düşük frekanslı hasatçılar tarafından üretilen güç ve güç yoğunluğunun karşılaştırılması .....	66
Çizelge 4.4. Enerji kaynaklarının yıllık ömür periyotlarına göre güç yoğunluğu bakımından kıyaslaması.....	67
Çizelge 4.5. Elektrik santrallerinin ortalama kuruluş maliyetleri.....	68

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
A	Akım
cm	Santimetre
C <sub>g</sub>	Grup hızı
CRC	Kanada Araştırma Başkanları Programı
d	Sakin haldeki su derinliği
DEĞİ	Dalga Enerjisi Gelişim İndeksi
EİGM	Enerji İşleri Genel Müdürlüğü
g	Yerçekimi ivmesi
GW	Gigawatt
H	Ortalama dalga yüksekliği
H <sub>s</sub>	Dalga yüksekliği
H <sub>z</sub>	Hertz
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattsaat
kW/m <sup>2</sup>	Kilowatt/metrekare
kHz	Kilohertz
L	Dalga boyu
m	Metre
mm	Milimetre
mA	Miliamper
mV	Milivolt
MW	Megawatt
MEMS	(Micro Electro Mechancial Systems) Microelektro Mekanik Sistemler
MΩ	Megaohm
Ne	Verim
NSERC	Kanada Doğa Bilimleri ve Mühendislik Araştırma Konseyi
OWC	Salınımlı Su Sütunu Cihazları
OWEH	Okyanus Dalgası Enerji Hasat Makinesi
P	Güç
P <sub>dens</sub>	Güç yoğunluğu
P <sub>p</sub>	Piezoelektrik hasat sisteminin elektriksel güç değeri
P <sub>p-ort</sub>	Ortalama piezoelektrik gücü
PV	Fotovoltaik
PVDF	Polivinilidinflorür
PZT	Kurşun-zirkonyum-titanyum
RMS	(Root Mean Square) Karelerinin ortalamasının karekökü
s	Saniye
T <sub>e</sub>	Dalga periyodu
TMMOB	Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği
TW	Terawatt
V	Hacim
V	Volt
W	Watt
μW	Mikrowatt
Φ	Enerji akısı
ρ	Deniz suyu yoğunluğu
%	Yüzde

## 1.GİRİŞ

Yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi her geçen gün artmaktadır. Güneş enerjisi, rüzgar enerjisi, hidroelektrik enerji ve dalga enerjisi gibi çeşitli alanlarda gelişmeye ve yaygınlaşmaya devam eden yenilenebilir enerji çeşitleri fosil yakıtlardan sağlanan enerjiye göre çevreci ve sürdürülebilir özelliktedir.

Dünya üzerindeki fosil enerji çeşitlerine baktığımızda hepsinin sonlu olduğunu ve sera gazı etkisi ile çevre üzerinde menfi etki yarattığını görmekteyiz. Büyük hidroelektrik santraller ise yaşam alanlarını kısıtlamakta, ekosistemi değiştirmektedir. Toryum, plütonyum gibi enerji kaynakları da sonlu olduğu gibi, bol enerji vaat etmelerine karşın yüksek teknoloji gerektirmekte, ayrıca atık maddelerin yaratacağı çevresel kirlilik ve meydana gelebilecek muhtelif tehlikelerin yok edilmesi sorununu ortaya çıkarmaktadır (Sağlam ve Uyar, 2018).

2017 yılı sonu yenilenebilir kaynaklardan elde edilen elektrik kurulu güç kapasiteleri ülkelere göre dağılım oranları Çizelge 1.1’de verilmiştir. Bu hesaplanmış yenilenebilir kaynaklı elektrik güç kapasitesi verilerine göre yenilenebilir enerjiden Çin 647 GW miktarı ile en çok fayda sağlayan ülkelerin başında geldiği açıkça belirtilmiştir. Bu yenilenebilir enerji kaynaklarına bakıldığında en fazla faydalanan ülkeler ve kaynakları sırasıyla; 313 GW’lık hidrolik enerji gücü miktarı, 188 GW’lık rüzgar enerji gücü miktarı ve 131 GW’lık fotovoltaik (PV) panellerden güneş enerjisi gücü miktarı ile Çin ilk sırada gelmektedir, 16,7 GW miktarı ile biyoyakıtlarda ABD ilk sırada olmaktadır (Koç, 2018).

2011-2017 yılları yenilenebilir elektrik güç kapasitelerini karşılaştırıldığında; 2011 yılı verilerine göre Dünya 1360 GW, Avrupa Birliği 294 GW ve Türkiye 19 GW yenilenebilir elektrik güç kapasiteleri bulunmakta iken bu güç kapasiteleri 2017 yılında sırasıyla 2235 GW, 447,2 GW ve 39,11 GW olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 1.1. Ülkelerin 2017 yılsonu yenilenebilir elektrik kurulu güç kapasitesi (GW)(Koç, 2018).

Enerji Kaynakları	Çin	ABD	Hindistan	Almanya	Türkiye	Avrupa	Dünya
<b>Hidroelektrik</b>	313	80	47	5.6	27.2	127	1114
<b>Rüzgar</b>	188	89	33	56	6.8	169	539
<b>Biyoenjerji</b>	15	16.7	9.5	8	0.63	40	122
<b>Güneş PV</b>	131	51	18.3	42	3.42	108	442
<b>Güneş Termal</b>	0	1.7	0.2	0	0	2.3	4.9
<b>Jeotermal</b>	0	3.6	0	0	1.06	0.9	13.5
<b>Toplam</b>	647	242	108	111.6	39.11	447.2	2235.4

Son altı yıl içerisinde yenilenebilir elektrik güç kapasiteleri bakımından büyük artış görülmektedir. Türkiye'nin yenilenebilir enerji toplam kurulu gücü 2017 yıl sonu itibariyle 39,11 GW miktarında belirtilmiş olup, elektrik üretiminin toplamına bakıldığında yaklaşık olarak %32'si yenilenebilir kaynaklar ile sağlanmaktadır (Karagöl, 2017).

Ülkemizde geçmiş 15 yıl içerisinde bakıldığında yenilenebilir enerji sektöründe önemli gelişmeler kaydedilmiştir. 2017 yılı dönemi içerisinde güneş, rüzgâr, hidrolik ve geri kalan yenilenebilir enerji kaynaklarından oluşan işletmedeki santrallerin kurulu gücünde yaşanan artış 2.128 MW olarak hesaplanmış olup, yenilenebilir kaynaklar kullanılarak elde edilen elektrik enerjisi 2002 yılında 34 milyar kWh iken, 2017 yılı sonu döneminde 69,4 milyar kWh olmuştur (Anonim, 2020a).

Türkiye'nin konumu yenilenebilir enerji kaynaklarının verimli kullanımı ve geliştirilmesi için oldukça elverişlidir. Güneş enerjisi ve rüzgar enerjisi ülkemizde son yıllarda kullanım alanı olarak yaygınlaşmaya devam etmektedir. Mevsimden mevsime farklılık göstermekle birlikte Türkiye gün içersinden uzun saatler güneş ışınlarına maruz kalmakta ve üç tarafı denizlerle çevrili bir ülke olmasından dolayı rüzgar ve dalga enerjisi için de elverişli bir konumda yer almaktadır.

Dalga enerjisini daha önceki yıllarda kullanıma başlayan ülkeler ihtiyaç duydukları elektrik enerjisinin bir bölümünü geliştirdikleri dalga enerjisi cihazları ile elde etmektedir.

Kullandıkları sistemler incelendiğinde genellikle santral tipi kıyıda veya denizin iç kesimlerine konumlandırılmış ve büyük alan kaplayan sistemlerdir. Sistemlerin doğa üzerinde fazlaca yer kaplaması doğanın görsel açıdan bütünlüğünü bozmakla birlikte kıyı kesimlerde yaşayan insanlar için gürültüye sebebiyet vermektedir. Bir elektrik üretim sisteminin yenilenebilir enerji kullanması kadar çevreye verdiği çeşitli olumsuzluklar da göz önünde bulundurulmalıdır.

Her ne kadar bulunduğu yere göre değişse de ortalama günlük güneş enerjisi akışı metre kare başına 100 W'dır. Güneş enerjisinin kullanımında yüzey etkin olduğundan yüzey örnek verilirse; ideal şartlarda 1 kW elektrik üretimi için 10 metrekarelik bir alan gereklidir. Rüzgar enerjisi kullanılarak aynı miktarda elektrik üretimi için 2 metrekare yer gereklidir. Dalga gücü için bu alan sadece 1 metrekaredir. Ayrıca okyanuslardaki bu gücün sadece yüzde biri bugünkü dünya enerji talebinin beş katından fazladır (Thorpe, 1999). Çizelge 1.2'de Güneş enerjisi, rüzgar enerjisi ve dalga enerjisi üretim miktarları verilmiştir.

Çizelge 1.2. Güneş enerjisi, rüzgar enerjisi ve dalga enerjisinin kW/m<sup>2</sup> başına enerji üretim miktarı (Polat, 2016).

Enerji Türü	Üretim Miktarı kW/m <sup>2</sup>
<b>Güneş Enerjisi</b>	0.1 – 0.2 kW/m <sup>2</sup>
<b>Rüzgar Enerjisi</b>	0.4 – 0.6 kW/m <sup>2</sup>
<b>Dalga Enerjisi</b>	2 – 3 kW/m <sup>2</sup>

Gelecekte fosil kökenli yakıtlara önemli bir alternatif olma potansiyelini taşıyan deniz dalga enerjisi, Karadeniz ve Akdeniz'de büyük bir fırsat olarak yer almasına rağmen, bu konuda hazır tüketme alışkanlığıyla işin kolayına kaçılmakta ve kısa vadeli günü kurtarmak amacıyla izlenen politik beklentiler sebebiyle, çok az kurum, kuruluş ya da kişi haricinde, yeterli çalışmalar yapılmamaktadır.

Delaware Üniversitesi tarafından yapılan dalga-enerji hesaplamalarına göre, okyanuslarda meydana gelen dalga ve Karadeniz ile Akdeniz'de yapılan ölçümlere göre birim alandaki mevcut deniz dalga enerjisi miktarları Çizelge 1.3'de verilmiştir.

Çizelge 1.3. Karadeniz, Akdeniz ve okyanuslardaki dalga yüksekliği ve dalga gücü (Çokan, 2003).

Bölge	Dalga Yüksekliği (m)	Dalga Periyodu (s)	Deniz Derinliği (m)	Güç (kW/m)
Karadeniz	1.25	4.0	50	1.92
Akdeniz	1.30	6.0	50	2.06
Okyanus	10	10	100	122
Okyanus	20	15	200	485

Türkiye'nin kullanılabilir dalga potansiyelini ortaya koymak, dalga araçları teknolojisi ülkemiz için uygun olan teknoloji tipi hakkında kararı vermek yönünden önemlidir.

Dalga enerjisini kullanarak elektrik üretmek için çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Daha önce farklı şekillerde projeler yapılarak dalga enerjisinden elektrik enerjisi elde edilmiştir. Örneğin; gelgit hareketlerinden yararlanarak suyu bir havuzda toplayarak ya da türbinlere döndürme hareketi vererek dalga enerjisinden elektrik üretimi gerçekleştirilmiştir. Denizin kaldırma kuvvetinden yararlanarak şamandıralı sistemler kurulabilmekte veya yüzeyde oluşan salınım hareketlerinden faydalanarak sistemler oluşturulabilmektedir. Söz konusu örneklerde dalganın kinetik enerjisinden yararlanılmıştır.

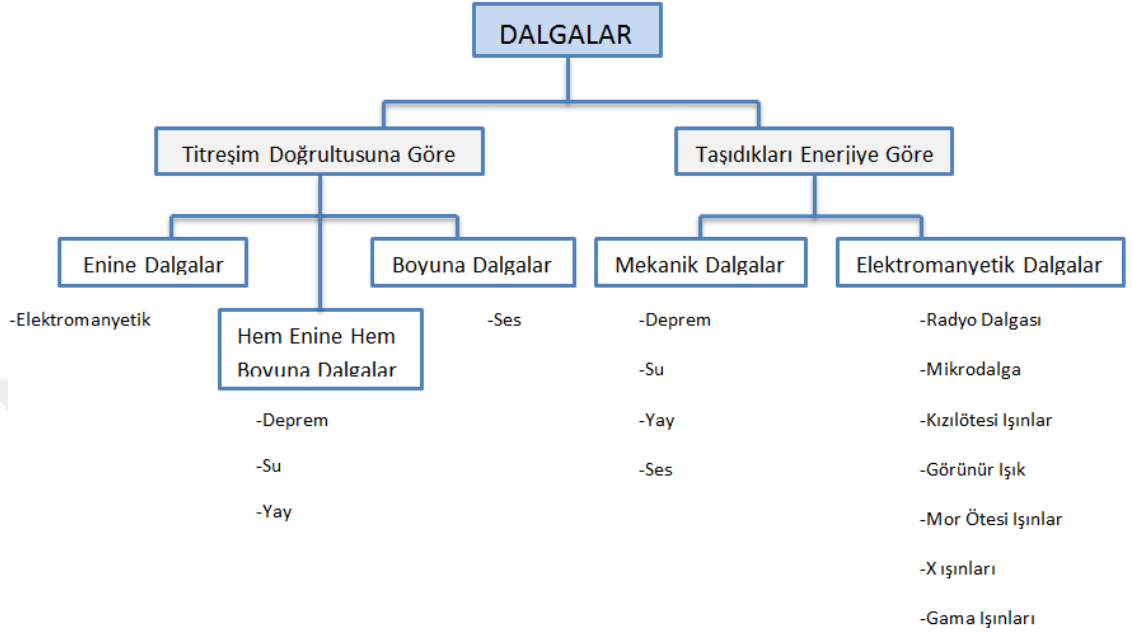
### 1.1. Dalga Enerjisi

Dalgalar gözle görülmezse de meydana getirdikleri etkilerle varlıkları anlaşılır. Bu gibi dalgalar bir yerden bir yere enerji taşırlar. Meselâ ses bir yerden bir yere ses dalgaları diye bilinen dalgalarla gider. Işık uzayda ışık dalgaları diye bilinen başka bir çeşit dalgayla yol alır. Sıcaklık dalgalar yardımı ile yer değiştirir. Radyo ve televizyon da radyo dalgaları sayesinde enerji taşırlar.

Işın yayan başka enerji şekilleri de morötesi ışınları, X ışınları, gama ışınları ve kozmik ışınlardır. Genel olarak bakacak olursak sarsıntı veya titreşim hareketinin bir ortam aracılığı ile iletilmesine dalga hareketi denir.



Dalga bir titreşim hareketidir. Bir ortama aktarılan enerjiyi başka bir ortama iletme şeklidir. Dalgalar titreşim doğrultusuna ve taşıdığı enerjiye göre Şekil 1.1'deki gibi sınıflandırılır (Yıldırım, 2015).



Şekil 1.1. Dalgaların sınıflandırılması (Yıldırım, 2015).

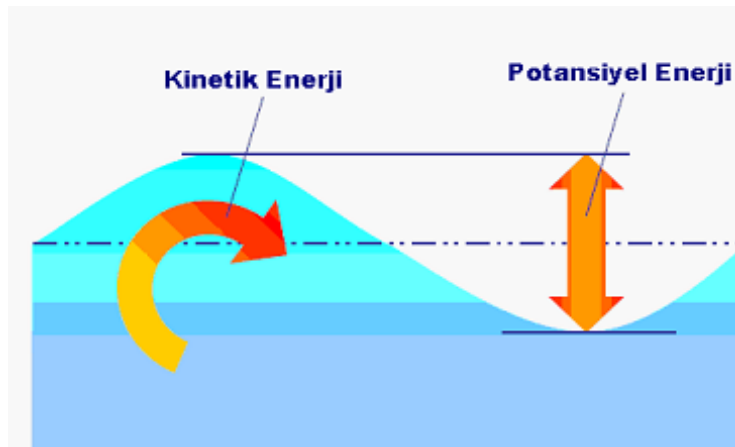
Durgun bir su birikintisine bir taş attığımızda, taşın suya düştüğü noktadan dışarıya doğru daireler şeklinde bir hareketin yayıldığını görürüz. Bu hareket bir dalga hareketidir. Yine benzer şekilde rüzgarlı havada bayrak direğindeki bir bayrağın hareketi veya rüzgarlı bir havada bir buğday tarlasındaki hareket dalga hareketidir (Yıldırım, 2015).

Aynı şekilde bir çakıl taşını göle attığımızda dalgaların oluştuğunu görmüştüzdür. Çakıl taşının oluşturduğu sarsıntı gölün kenarında son bulur. Eğer sarsıntının yakınında yüzen bir yaprağın hareketini dikkatlice incelersek onun ilk konumu etrafında aşağı yukarı hareket ettiğini fakat sarsıntı kaynağının asla uzaklaşmadığını ya da ona yaklaşmadığını görürüz. Yani su dalgaları (veya sarsıntı) bir yerden başka bir yere hareket eder fakat su onunla birlikte hareket etmez. Böyle olmasaydı su yüzeyinde oluşan dalga ile birlikte denizin tamamının hareket etmesi gerekirdi. Oysaki yüzeyde oluşan dalgalardan dolayı su içerisinde hiçbir değişiklik gözlenmez (Uyar, 2016).

Deniz dalgalarının kaynağı rüzgârlardır. Deniz yüzeylerinde rüzgarın etkisiyle oluşan salınım hareketlerine de “Dalga” denir. Bu dalgalar incelendiğinde deniz kıyısının şekli ne olursa olsun dalgaların hep kıyıya paralel gelip çarptıklarını görürsünüz. Deniz yüzeyine çarpan rüzgâr, suyun hareketlenmesini sağlar. Ancak dalgaların sahile arka arkaya paralel bir şekilde gelip çarpmalarının sebebi rüzgâr değildir. Açık denizde dalgalar, bizim sahilden seyrettiğimiz gibi düzgün değildir. Rüzgâr bir yönden ve düzgün şekilde esmez. Hava şartlarıyla birlikte karışık yönlerden su yüzeyine çarpan hava, düzensiz dalgalar oluşturur. Bu düzensiz dalgalar sahile değişik açılarla yaklaşır (Özada, 2015; Uyar, 2016).

Rüzgarın esmesi ile deniz ve okyanus yüzeyinde kinetik enerji meydana gelmektedir. Aktarılan kinetik enerji, dalga formunda deniz yüzeyinde depolanmakta ve çok fazla yük kaybına uğramadan kilometrelerce ötedeki mesafelere iletilebilmektedir. Bu iletim, dalganın sahip olduğu enerjinin göstergesidir. Dalgaya aktarılan kinetik enerji farklı şekillerde dalga içerisinde depolanarak dalganın hareketini sağlamaktadır. Bu hareket boyunca dalga içerisindeki enerji de değişimler ve dönüşümler göstermektedir. Dalgalarda enerji, kinetik ve potansiyel enerji olmak üzere iki şekilde depolanmaktadır. Kinetik enerji, deniz yüzeyindeki parçacıkların dairesel hareketi, potansiyel enerji ise dalgaların deniz seviyesinden yükselmesinin bir ölçüsü olarak tanımlanmaktadır (Şekil 1.2).

Lineer bir dalganın ortalama kinetik enerjisi, potansiyel enerjisine yaklaşık olarak eşit olup, bir dalga ile taşınan enerji akısı dalganın yüksekliğine ve periyoduna bağlıdır (Polat, 2016).



Şekil 1.2. Kinetik ve potansiyel enerji (Polat, 2016)

Rüzgar okyanus yüzeyinin üzerinde kayarken, rüzgardan gelen kinetik enerjinin bir kısmı dalgaların altından su altına kaydırılır. Nitekim okyanus, güneş ışınlarının okyanuslara ilettiği devasa bir enerji depo koleksiyoncusu olarak görülebilir; dalgalar, iletilen kinetik enerjiyi okyanus yüzeyinden geçirir. Bunu akılda tutarak, dalgaların okyanus yüzeyinde kayan su değil bir enerji şekli olduğu sonucuna varılabilir. Bu dalgalar geniş bir okyanus boyunca çok fazla enerji kaybetmeden seyahat edebilmektedir. Bununla birlikte, su derinliğinin sığ olduğu kıyı şeridinde ulaştıklarında, hızları azalırken boyutları önemli ölçüde artar. Sonuçta, dalgalar kıyıya vurarak, büyük miktarda kinetik enerjiyi deşarj etmektedir.

Dalgaların, rüzgarın etkisi ile belli bir kural olmaksızın salınım hareketi yaptığı bilinmektedir. Rüzgarın şiddeti ve su yüzeyine yapmış olduğu etkileşim arttıkça denizde oluşan dalganın gücü de artmaktadır. Burada oluşan kinetik ve potansiyel enerji, çeşitli sistemler kullanılarak elektrik enerjisine dönüştürülebilir.

## **1.2. Dalga Enerjisinin Avantajları**

- Tükemeyen enerji kaynağıdır ve sonsuzdur,
- Yenilenemeyen ve tükenebilir olan fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltır,
- Temiz enerji kaynağı olan dalga enerjisi çevreyi ve doğayı kirletmez,
- Ekonomik açıdan yeni iş imkanları oluşturur ve işsizliği azaltır,
- Elektriğin olmadığı yerlerde elektrik sağlar,
- Deniz ve okyanus gibi yerlerde yapılacak olan çalışmalar ile potansiyel teknolojilerin kullanımına da imkan tanır,
- Ayrıca temiz içme suyu elde etmede de kullanılır. Tuzlu suyu tatlı suya çevirebilir. Bunun en büyük örneği, yavru vatan Kıbrıs'ta yıllardır deniz suyu arıtılarak içme suyuna çevrilerek kullanılıyor,
- Deniz ve okyanus diplerindeki zenginlikleri keşfetmemize olanak tanır,
- Su kaynaklarımızın kıyılarını da korumamızı sağlar (Uyar, 2016)

## **1.3. Dalga Enerjisinin Dezavantajları**

Birçok enerji kaynağı gibi dalga enerjisi de bazı dezavantajlara sahiptir;

- İlk yatırım maliyetleri yüksektir.

- Dalga enerjisi sistemleri gelişiminin ilk safhasında olduğu için gerçek maliyetin belirlenmesi de zordur.
- Ekolojik açıdan, sığ sular çoğu deniz canlısı için verimli üreme ve dinlenme alanıdır. Bu nedenle dalga enerjisi tesisinin yapımı ve işletilmesi faaliyetleri deniz ekosistemini büyük ölçüde etkileyebilir.
- Tesisteki hidrolik sıvılardan gelen kazara sızıntılar, suyu potansiyel olarak kirletip deniz yaşamı ölümlerine neden olabilir.
- Dalga enerjisi ile elektrik üretebilmek için her dalga boyuna göre sıfırdan bir tasarım yapmak gerekir. Çünkü her dalganın boyu aynı değildir. Bu yüzden standart bir dalga enerji sistemi de yoktur.
- Dalga enerjisi sistemleri uygulanırken karşısına pek çok sıkıntılı bölgeler çıkabilmektedir. Bunlar gemi rotaları (güzergahları), askeri tatbikat alanları, balık avlanma sahaları ve deniz altından giden kablolar gibi. Eğer bunlara dikkat edilmezse, çok büyük sorunlar ortaya çıkabilmektedir (Uyar, 2016).

#### **1.4. Dalga Enerjisinin Tarihsel Gelişimi**

Deniz dalga enerjisinden yararlanma fikri sonucu ilk patentli teknikler 1799 yılında Girand ve Son'a (Fransa) aittir.

1932 yılında dalgaların büyük gücünü fark eden Osborn Havelock papazları, 1933'te dalga enerjisi düşüncelerine patent almışlardır. Leishman ve Scobie 1955-1973 yılları periyodundaki ilk İngiliz patentinden başlayarak dalga gücünden enerji olarak çalışan sistemleri ve gelişmelerini belgelemişlerdir. O yıllarda 340 patent bulunmaktadır.

Dalga enerjisi konusunda 1932 yılından 2001 yılına kadar alınan patent sayısı 259, 2003 Mart ayı itibari ile 292 olarak tespit edilmiştir (Ün, 2003).

Bir çok dalga enerjisi dönüşüm sisteminin dizayn ve model bazında test ve konfigürasyonları yapılmış ve bazıları halen kullanılmaktadır. Bugün itibariyle dalga enerjisi üretim sistemleri üzerine 1000'in üzerinde patent alınmıştır (Ün, 2003).

Avrupa’da ve dünyada dalga enerjisi dönüşümü konusunda ileri seviyede araştırmalar devam etmiş, ancak bu çalışmalar 1973 yılındaki petrol fiyatlarının artışından sonra daha da hızlanmıştır. Dalga enerjisi kaynakları olan bir çok farklı Avrupa ülkesi dalga enerjisini enerji temini için potansiyel olarak görmüş ve programlar baslatmışlardır.

İngiltere, Portekiz, İrlanda, Norveç, İsveç ve Danimarka ülkeleri başta olmak üzere kısa ve uzun dönem amaçlı dalga enerjisi transferi üzerine çalışmaya başlamışlardır. Bu alanda; Shaw, Lewis, Salter, Ross, Petrocint, Thorpe ve diğerleri tarafından çalışmalar yapılmaktadır. 1986 yılından itibaren bu alandaki çalışmaları gözleyen Avrupa Birliği verdiği teşvikle bu alandaki çalışmalara hız katmıştır. Komisyonun çalışmaları etkili olarak 1994 yılında “Framework” programıyla başlamış ve benzer çalışmalar bu programı takip etmiştir.

1993’ten başlayarak komisyon bir konferansı teşvik ederek bu alandaki çalışmaları canlandırma ve Avrupa’da okullarda, araştırma merkezleri ve endüstrideki çalışmaları koordine etmiştir. Son 25 yılda dalga enerjisi çalışmaları devirli bir sürece girmiş ve zaman zaman mutlu edici, zaman zaman olumsuzluklarla sonuçlanan neticeler alınmıştır.

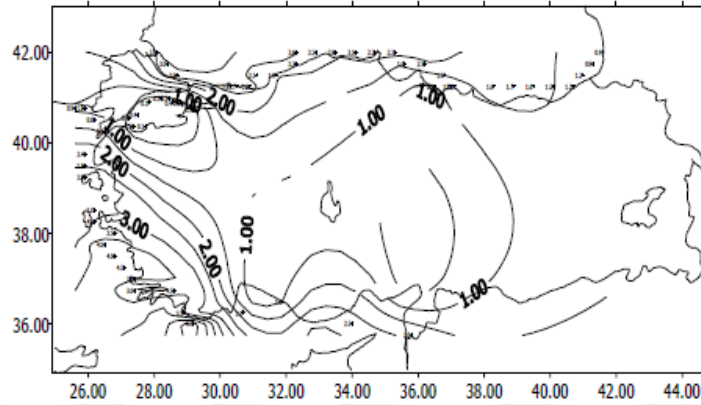
Halen bir çok proje, sistemlerin büyük boyutlarda, ağır koşullarda çalışabileceğini ispatlamış olup, Avrupa, Avustralya, İsrail, Amerika, Japonya ve diğer ülkelerde son zamanlarda bu sistemler kurulmuştur (Clément vd., 2002).

Dalga enerjisi kullanan ülkeler;

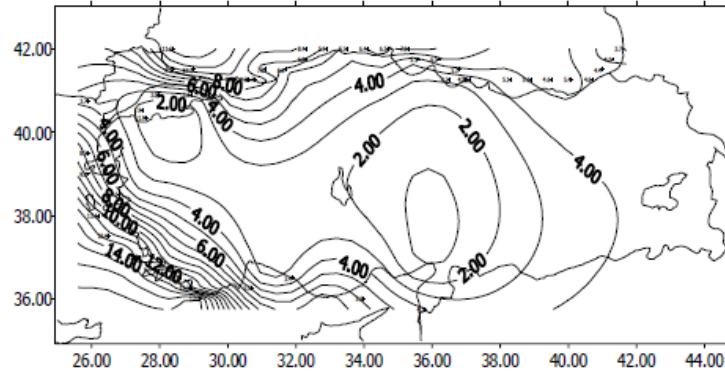
- Orkney Dalga Enerjisi İstasyonu – 2,4 MW – İngiltere,
- Agucadoura Dalga Tarlası – 2,25 MW – Portekiz,
- Islay Limpet – 500 kW – İngiltere,
- Mutriku Breakwater Dalga Tarlası – 300 kW – İspanya,
- Azura Dalga Enerji İstasyonu – 200 kW – Amerika,
- SDE Deniz Dalgası Güç İstasyonu – 40 kW – İsrail (Uyar, 2016).

## 1.5. Türkiye’de Dalga Enerjisi Potansiyeli

NATO TU WAVE projesi sonucunda oluşturulan “Türk Kıyı Rüzgarları ve Derin Dalga Atlası” verilerinden yararlanarak yaklaşık dalga yüksekliği ve dalga periyodu değerleri ile minimum enerji akışı için aylık ortalama, maksimum enerji akışı için aylık ortalamaların matematik ortalaması kullanılarak hesaplanan Türk sularının kullanıma hazır yaklaşık azami ve asgari dalga enerji seviyeleri verilmiştir (Sağlam, 2018).



Şekil 1.3. Asgari dalga enerji seviyeleri (Sağlam ve Uyar, 2018).



Şekil 1.4. Azami dalga enerji seviyeleri (Sağlam ve Uyar, 2018).

Karadeniz’in diğer denizlere göre daha dalgalı olduğu iddialarının aksine, güneybatı Anadolu yönünde hakim olan Ege Denizi ve Akdeniz üzerindeki rüzgar potansiyeli 4-17 kW/m’lik yıllık ortalama dalga gücünde bir yoğunlaşmaya neden olmaktadır.

Dalga enerjisinden yararlanmak, daha doğrusu çalışmalara başlamak için en uygun yer İzmir-Antalya arası veya tam olarak belirtmek gerekirse Dalaman-Finike arasına tekabül eden denizlerdir.

Bölgesel ortalama dalga yoğunlukları aşağıdadır;

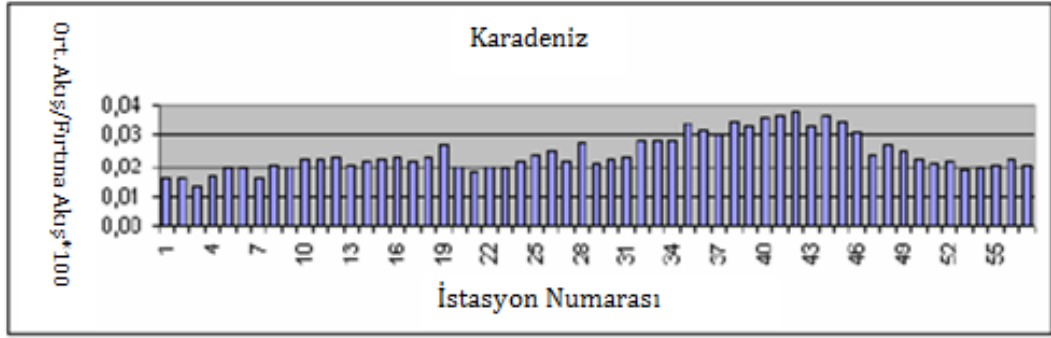
<b>Bölge</b>	<b>Güç</b>
• Karadeniz	1.96-4.22 kWh/m
• Marmara Denizi	0.31-0.69 kWh/m
• Ege Denizi	2.86-8.75 kWh/m
• Akdeniz	2.59-8.26 kWh/m
• İzmir-Antalya	3.91-12.05 kWh/m

Derin sulardaki toplam ortalama dalga enerji kaynakları, Türkiye kıyı şeridi boyunca dalga güçlerinin birleştirilmesiyle değerlendirilebilir. Eğer gemi rotaları, denizaltı tatbikat sahaları, Marmara Denizi'nin kıyı yerleşim yerleri, vb. dışarıda bırakılır, dalga gücü düzeyleri ticari tüketim için düşük olan Anadolu'nun kuzeydoğusundaki ve güneyindeki dalga kaynaklarının pek çoğu göz ardı edilirse, Türkiye'nin toplam kıyı uzunluğunun (8210 km) beşte biri kadarının denizden dalga enerjisi elde etmede kullanılabileceği varsayılabilir.

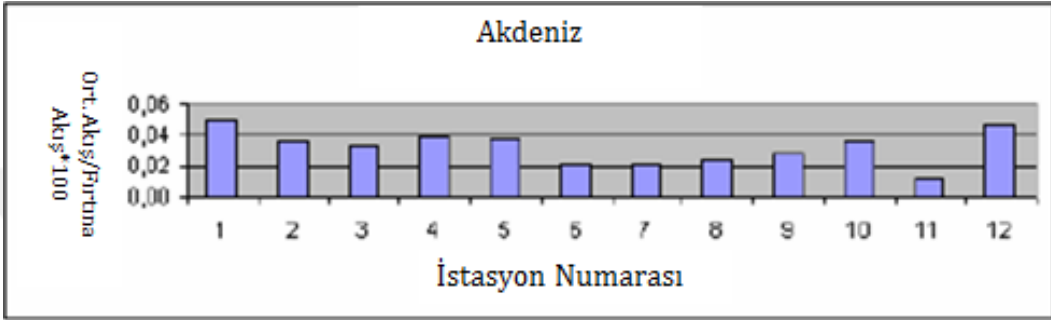
Sadece bir dizi küçük ölçekli dönüştürücüden, yıllık 4-17 kW/m arasında dalga gücü olan sularda, toplam yaklaşık en az 10 TWh/yıl enerji elde edilebilir. Bu, ekonomik olarak üretilebilir Türkiye Hidroelektrik enerji potansiyelinin %12,5'idir (Sağlam ve Uyar, 2018).

Yukarıdaki değerler yaklaşık sonuçları yansıtmaktadır. Dalga enerjisi için diğer önemli parametre "Dalga Enerjisi Gelişim İndeksi" (DEGI) değerleridir. Yıllık ortalama dalga enerji akışının, fırtına boyutlarındaki dalga enerji akışına bölünmesidir. Böylece birimsiz bir değer sayısı elde edilir ki bu da DEGI'yi verir. Şekil 1.5, 1.6, 1.7 ve 1.8'de Türkiye'de bulunan denizlere göre DEGI değerleri verilmiştir. Denizlerdeki DEGI değerleri yüksek olmayan, fakat dalga enerji seviyesi yüksek olan noktalar en iyi üretim noktaları olarak nitelenmektedir.

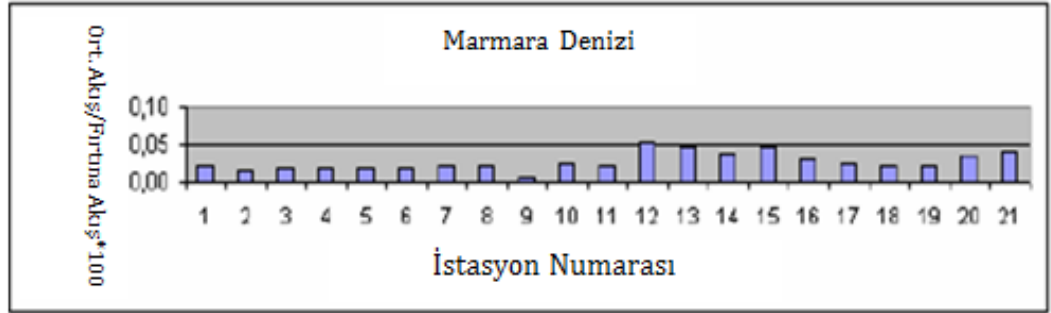
Çünkü yüksek DEGI değerleri denizdeki belirli bir noktadaki yıllık ortalama dalga enerjisi potansiyelinin elde edilebilmesi için tasarlanacak dalga dönüştürücüsünün yatırım maliyetini arttıracaktır (Sağlam, 2018).



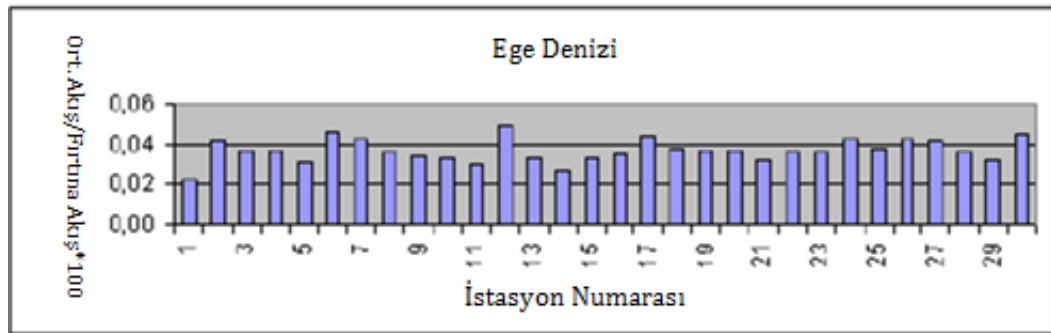
Şekil 1.5. Karadeniz DEĞİ değerleri (Sağlam, 2018)



Şekil 1.6. Akdeniz DEĞİ değerleri (Sağlam, 2018)



Şekil 1.7. Marmara Denizi DEĞİ değerleri (Sağlam, 2018)



Şekil 1.8. Ege Denizi DEĞİ değerleri (Sağlam, 2018)

Enerji, ulusal ekonominin ilerlemesini tanımlayan en belirgin bileşendir. Ayrıca, sosyo-ekonomik gelişim ve toplumların yaşam standartlarının artırılması açısından büyük önem arz etmektedir.



Enerjide dışa bağımlılık ancak ülkemiz potansiyelinde bulunan enerji kaynaklarının planlama safhasında birleştirilmesi ve uygulanacak enerji politikalarının bu yönde şekillenmesi ile engellenebilecektir (Sağlam, 2018).

### 1.6. Dalga Enerjisi Hesabı

Dalga enerjisi literatürde çeşitli tanımlar altında ifade edilebilmektedir. En basit hali ile enerji akısı fizikteki kavramlar cinsinden denklem 1.1'deki gibi tanımlanabilir:

$$\text{Enerji akısı} = \phi = \frac{\text{Güç}}{\text{Alan}} = \frac{\text{Enerji}}{\text{Alan} \times \text{Zaman}} \quad (1.1)$$

olup, enerji ise:

$$E = \text{Kuvvet} \times \text{Yol} \quad (1.2)$$

olarak tanımlanmaktadır.

Bir denizdeki yaklaşık anlık güç 0.49 sabitinin belirgin dalga yüksekliğinin karesi,  $H_s^2$  ve periyodu,  $T_e$  ile çarpımı ile tahmin edilebilir;

$$P = 0,49H_s^2T_e \quad (\text{kW/m}) \quad (1.3)$$

Deniz dalgalarının birim (metre) uzunluğuna tekabül eden güç

$$P = \frac{1}{8}\rho \cdot g \cdot H^2 \cdot C_g \quad (\text{W/m}) \quad (1.4)$$

olarak tanımlanmaktadır (Mert, 2012).

$\rho$  : Deniz suyu yoğunluğu (1025 kg/m<sup>3</sup>),

$g$  : Yerçekimi ivmesi (9.81 m/sn<sup>2</sup>),

$C_g$  : Grup hızı (m/sn),

$H$  : Ortalama dalga yüksekliği (m),

$P$  : Güç (W/m),

Açık deniz koşullarında dalga yayılma hızı ve dalga boyu aşağıdaki şekilde yazılabilmektedir:

$$C_g = \frac{c}{2} \quad (1.4a)$$

$$c = \frac{L}{T} \quad (1.5)$$

Sığ su şartlarında, hız artık derinliğin fonksiyonu olur.

$$c = \sqrt{g \cdot d} \quad (1.6)$$

olur (Zöhra, 2011).

d : Sakin haldeki su derinliği.

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (1.7)$$

L : Dalga boyu. (Durmuş, 2007).

Aşağıdaki eşitlikte, P değeri ortalaması alınan dalga boyuna göre hesaplanabilen güç kapasitesini,  $P_{p-ort}$  değeri ise hasat sisteminin ürettiği ortalama güç miktarını ortaya koymaktadır. T dalganın periyodunu, H ise hesapta kullanılan dalga yüksekliğini göstermektedir.  $N_e$  değeri, üretilen güç miktarının dalganın gücüne oranını yani sistemin verimini göstermektedir (Polat, 2016).

$$N_e = \frac{P_{p-ort}}{P} \times 100 \quad (1.8)$$

### 1.7. Dalga Enerjisinin Elektriğe Dönüşmesi

Dalga enerjisi, geçmişten bu güne kadar yapılan farklı sistemler yardımı ile elektrik enerjisine dönüştürülebilen yenilenebilir enerji kaynağıdır.

Dalgaların geliş yönüne yapılan bir daralan kanal sistemi ile suyun potansiyel enerjisinden yararlanarak havuza biriktirilen suyun su türbinini döndürmesiyle elektrik enerjisi elde edilebilmektedir.

Kıyı şeridi sistemleri ile dalganın sistemde bulunan hava odasındaki havayı sıkıştırmasıyla wells türbininin dönme hareketinden elektrik enerjisi elde edilebilmektedir.

Açık deniz sistemlerinden olan pelamis ise içerisinde bulundurduğu hidrolik sıvının dalga hareketi ile sistem içerisinde akışını sağlayıp sistemde bulunan hidrolik pompaları tetiklemekte ve elektrik üretimi yapmaktadır. Bahsi geçen sistemler dalga enerjisi toplama cihazlarında detaylı olarak anlatılmaktadır.

### **1.8. Dalga Enerjisi Toplama Cihazları**

Dalga enerjisi, güneş enerjisinin etkisiyle meydana gelen ve okyanusların üzerinde doğal olarak rüzgar enerjisinin transferiyle ortaya çıkan, kirlenici olmayan ve yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. Rüzgar okyanusların yüzeyinde esiyorken, hareketli hava parçacıkları enerjilerini dokundukları su moleküllerine aktarmaktadır. Kinetik enerjiye maruz kalmış olan su molekülleride dalgaları meydana getirmektedir.

Bir okyanus dalgası durağan bir pozisyondan geçerken, deniz yüzeyi yüksekliği değişir, yüzeye yakın su, kinetik ve potansiyel enerjisini yitirirken, yüzey altındaki basıncın durumunu değiştirmektedir.

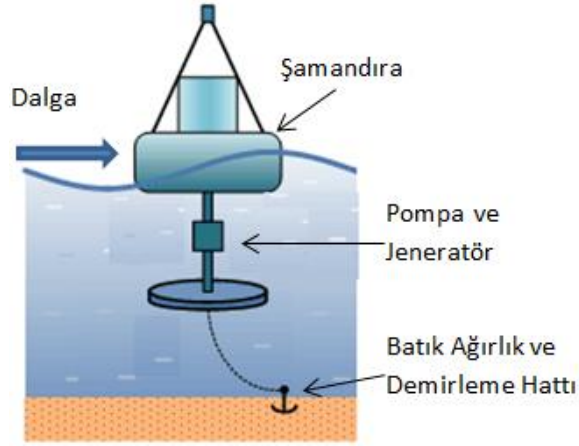
Okyanus dalgalarının periyodik veya salınımlı doğası, okyanus dalgalarının ürettiği enerjiyi kullanmak için çeşitli dalga enerjisi aygıtları kullanabileceğimiz anlamına gelmektedir (Anonim, 2019a).

Dalga gücünü elektrik enerjisine dönüştürmede kullanılan üç temel ancak çok farklı dalga enerjisi cihazları vardır. Bu cihazlar sonraki bölümlerde detaylı olarak incelenmiştir.

### 1.8.1. Dalga profil cihazları

Okyanus yüzeyinin salınım yüksekliğini mekanik enerjiye dönüştüren dalga enerjisi cihazlarıdır (Şekil 1.9).

Dalga profili cihazları, deniz yüzeyinin üzerinde veya yakınında yüzen ve meydana gelen dalganın şekline karşılık olarak hareket eden veya dalgıç cihazlar için su altı basıncındaki değişikliklerin etkisi altında yukarı ve aşağı hareket eden bir dalga enerjisi cihazı sınıfıdır (Anonim, 2019a).



Şekil 1.9. Dalga profil cihazları yapısı-1 (Anonim, 2019a).

Dalga profili cihazının fiziksel boyutu, dalganın periyodik uzunluğuna kıyasla çok küçükse, bu tür dalga enerjisi cihazına "nokta emici" denir.

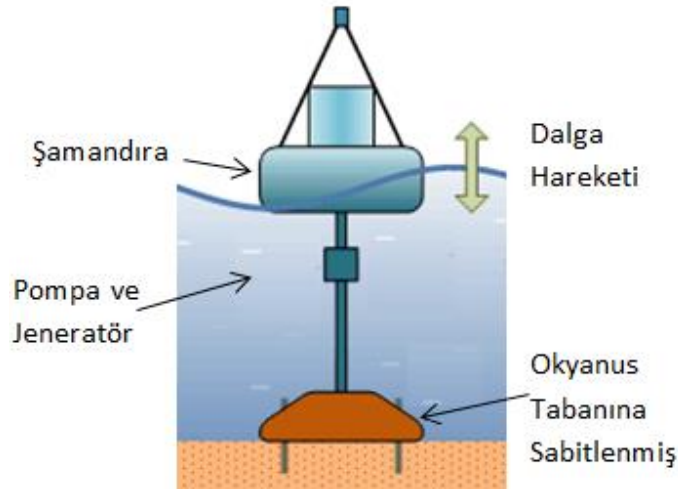
Cihazın ebadı tipik periyodik dalga boyundan daha büyük veya daha uzunsa, 'doğrusal emici' olarak adlandırılır, ancak daha genel olarak topluca 'dalga zayıflatıcıları' olarak bilinir. İki dalga enerjisi cihazı arasındaki temel fark, salınımlı sistemin dalga enerjisini emici ile reaksiyon noktası arasında nasıl dönüştürdüğüdür. Bu enerji emilimi, bir şamandıra yapısının kendi içinde yüzen bir cisim, salınan bir katı eleman veya salınan su ile sağlanabilir (Cai, 2017).

Dalga enerjisi, dikey hareket (kabarma), dalga hareketi yönünde yatay hareket (dalgalanma), dalga tepelerine paralel bir merkez eksen etrafında açısız hareket (eğim) veya dikey bir eksen etrafındaki açısız hareket kullanılarak emilmektedir.

Dalga tarafından oluşturulan kuvveti etkin biçimde kullanmak için, bir tür kuvvet reaksiyonuna ihtiyaç vardır. Başka bir deyişle, şamandıra üzerindeki dalga kuvvetinin başka bir sert veya yarı sert gövdeye karşı reaksiyon göstermesi istenmektedir. Reaksiyon noktaları, ağır süspansiyonlu balast plakaları, deniz tabanı çapaları veya gösterildiği gibi sabit bir ölü ağırlık gibi atıl kütleler olabilir.

Şekil 1.9'da yüzen şamandıranın altında asılı ağır bir balast plakası kullanılmıştır. Şamandıranın, deniz tabanı çapasına tutturulmuş bir bağlama hattı ile uzaklaşması önlenmiştir. Bu bağlama hattı, nokta emicinin daha derin sularda açık denizde çalışmasını sağlamaktadır (Anonim, 2019a).

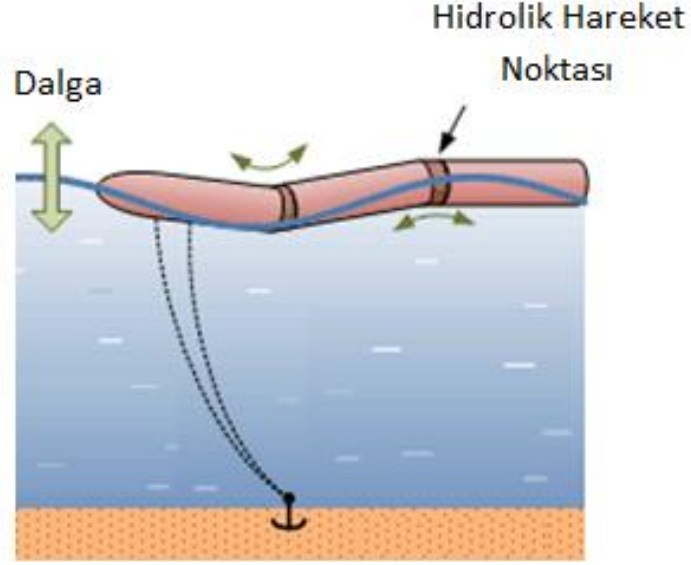
Şamandıra dalgalar halinde yukarı aşağı hareket ederken, serbestçe hareket eden emici ile ağır plaka arasında salınan bir karşılıklı kuvvet reaksiyonu meydana gelmektedir ve aralarında bir hidrolik pompanın elektrik üreten bir jeneratörü döndürmesine neden olmaktadır.



Şekil 1.10. Dalga profil cihazları yapısı-2 (Anonim, 2019a).

Şekil 1.10'da dalga enerji cihazı önceki yüzer şamandıra cihazına benzer şekilde çalışmaktadır. Bu seferki fark, serbestçe hareket eden şamandıranın, okyanus tabanındaki sabit bir ölü ağırlık gibi sabit bir reaksiyon noktasına sabitlenmesidir.

Bu tip nokta emici dalga enerjisi cihazları aşağıya monte edildiğinden kıyı konumlarının yakınında daha sığ bir yerde kullanılmaktadır (Anonim, 2019a).



Şekil 1.11. Dalga profil cihazları yapısı-3 (Anonim, 2019a).

Şekil 1.12’ de Pelamis olarak da adlandırılan sistem, menteşeli bağlantılar ile birbirine bağlanan silindirik bölümlerden oluşan ve kısmen sınırlandırılmış mafsallı bir yapıdır (Yükselci, 2016). Bu sistem, suyun yüzeyinde yüzen doğrusal bir emiciye (dalga zayıflatıcı) örnektir.



Şekil 1.12. Pelamis örneği (Anonim, 2012a).

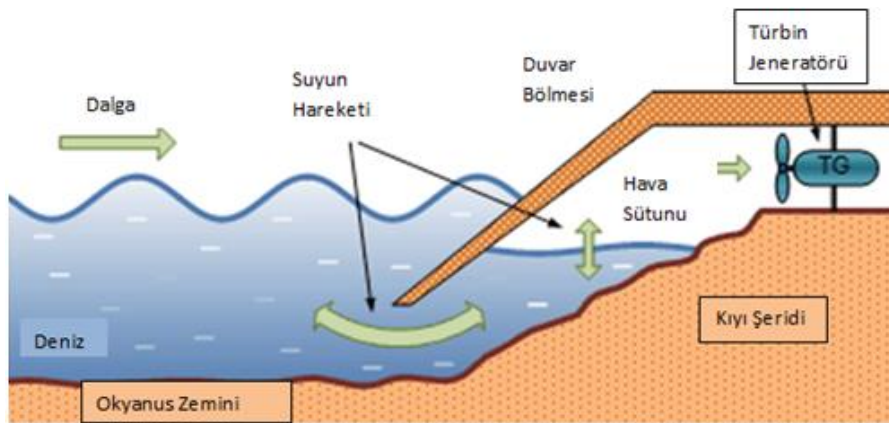
Okyanus tabanına bağlanmıştır, böylece gelen dalgalara doğru dikey olarak sallanabilmektedir. Cihazın gövdesi boyunca bağlantı derzleri bulunmaktadır, her eklemdede çok fazla kuvvet uygulayan dalgaların etkisiyle bükülmektedir. Sistemin bir avantajı da birkaç açık deniz cihazının birbirine bağlanabilmesi ve tek bir su altı kablosu üzerinden kıyı şeridinde bağlanabilmesidir.

### 1.8.2. Salınımlı su sütunu cihazları (OWC, Oscillating Water Colum Devices)

Bir kıyı şeridi cihazının bir ana sınıfı, su hattının altında denize açılan bir açıklığa sahip olan, su sütununun üzerinde bir hava sütununu çevreleyen, kısmen daldırılmış beton veya çelik yapı olan salınan su kolonudur (Çağrı, 2017).

Salınımlı su kolonu (OWC), normal olarak, bir derin deniz tabanına gelecek olan kayalar veya uçurumlar üzerine ya da yakınına yerleştirilmiş bir popüler kıyı dalga enerjisi cihazdır. Dalga enerjisini hava basıncına dönüştüren doğrudan kıyıya sabitlenmiş, kısmen batık oyuk bir odadan oluşur (Şekil 1.13).

Dalgaların enerjisini yakalamak için kullanılan yapı, bir su deliği ile doğal bir mağara veya su yüzeyinin en üstünde bulunan bir rüzgar türbini jeneratörü ile insan yapımı bir oda veya kanaldan oluşabilmektedir. Her iki durumda da yapı, okyanus yüzeyinin bir kısmı su hattının altındaki denize açık olan odanın içine hapsolmuş dalgalara dik olarak inşa edilmiştir. Dalgaların sabit toparlanma ve akma hareketi, bölme içindeki sıkışmış suyu dikey yukarı yönde salınmaya zorlamaktadır.



Şekil 1.13. Salınımlı su sütunu cihazları yapısı (Anonim, 2019a).

Dalgalar cihaza çarptığında, su kolonunun yükselmesine ve düşmesine neden olur, bu da hava sütununu dönüşümlü olarak sıkıştırır ve bastırır. Bu havanın bir elektrik jeneratörünü tahrik eden turbin aracılığıyla atmosfere akması sağlanmaktadır.

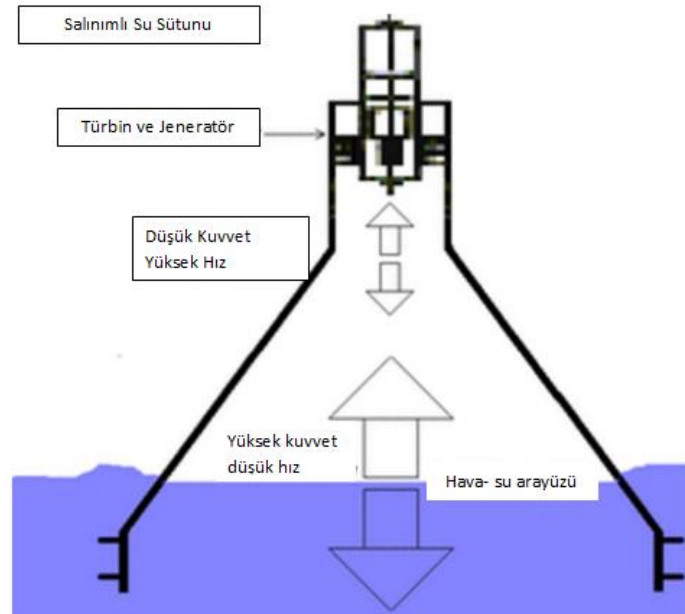
Dalgalar odaya girip çıktığında, açıklıktaki dalga hareketindeki değişiklikler, muhafaza içindeki su seviyesinin aşağı yukarı sallanmasına sebep olmaktadır.

Ayrıca su yüzeyindeki hava üzerine baskı uygulayarak burada havanın dev bir piston gibi hareket etmesine neden olmaktadır. Hava her döngüde bu hareket tarafından sıkıştırılmaktadır. Hava, Şekil 1.13’de gösterildiği gibi elektrik üretmek için bir rüzgar türbini jeneratörü üzerinden yönlendirilmektedir (Anonim, 2019a).

Salınımlı bir su kolonu tasarımında kullanılan rüzgar türbini jeneratörü tipi dönüşüm verimliliğinin kilit unsurudur. Haznenin içindeki hava, deniz suyunun her yukarı ve aşağı hareketi ile türbin boyunca emme ve üfleme etkisi yaparak sürekli ters yönde bir harekettedir. Bağlanan jeneratörü sürmek için geleneksel bir türbin kullanılmışsa, bu da hava akışına paralel olarak sürekli yön değiştiriyor olacaktır. Bu sorunun üstesinden gelmek için, salınımlı su kolonu şemalarında kullanılan rüzgar türbini türüne Wells Türbini adı verilmektedir.

Wells türbini, kolondaki hava akış yönünden bağımsız olarak aynı yönde dönme özelliğine sahiptir.

1970’li yıllarda icat edilen aksenal akışlı Wells türbini, bu tür uygulamalar için en iyi bilinen türbin olup, rektifiye edici hava valfleri gerektirmemesi avantajına sahiptir (Çağrı, 2017).



Şekil 1.14. OWC'nin alternatif yapısı (Cai, 2017).



Şekil 1.14'te dalgalara dik olarak yerleştirilmiş bir türbini olan sistem alternatif bir yapı sunmaktadır. Hazne, su yüzeyinin bir kısmını içeride yüzeyin üstünde hava ile tutulmaktadır.

Su hattının altında, denize açıktır. Yapının içindeki su, dalganın sürekli akan ve salınan hareketi ile yukarı aşağı hareket etmeye zorlanmaktadır.

Dalgalar odaya girip çıktığında, oda içindeki su seviyesi yukarı ve aşağı yönde salınmaya başlamaktadır. Muhafazanın içindeki su sütunu, yukarı ve aşağı hareket eden bir piston gibi hareket eder ve havayı yapıdan dışarıya itip içine geri çekmektedir. Bu sürekli hareket sayesinde, hava her çevrimde sıkıştırılır. Elektrik üretmek için tersine çevrilmiş bir yüksek hızlı hava akımı bir türbin jeneratöründen geçirilmektedir.

OWC çevre dostu bir enerji toplayıcıdır. Bununla birlikte, okyanusta geliştirilen diğer dönüştürücülerle karşılaştırıldığında, OWC çevresel etkiler açısından diğer yenilenebilir cihazlar kadar iyi performans göstermemektedir.

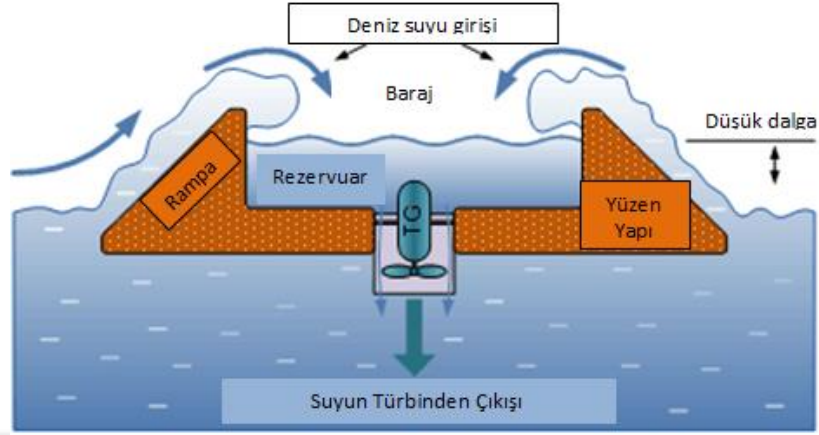
OWC dönüştürücünün bir yaşam döngüsü değerlendirmesi vardır, 25 yıldaki karbon emisyonlarının inşaat, kurulum ve işletme de dahil olmak üzere 24 gram karbon dioksit olacağını göstermektedir (Cai, 2017). Bu arada, derin deniz tesisatıyla, OWC belirli bir bölgedeki deniz türlerini artıracak bir resif gibi çalışma olanağına sahiptir. Dezavantajı ise dalga ortamının belirsizliğidir, çünkü dalga periyodu ve genliği kontrol etmek zordur. OWC güç çıkışı, mevsime göre değişen genlik, hız ve frekans dahil olmak üzere dalga enerjisi seviyesine dayanmaktadır.

Dünya çapında bir dizi OWC cihazı kurulmuştur ve bunların birçoğu genel inşaat maliyetlerini düşürmek için bir dalgakıranın içine yerleştirilmiştir (Çağrı, 2017).

### **1.8.3. Dalga yakalama cihazı**

Dalga yakalama cihazı yada farklı bir ismi ile üst üste gelen dalga dönüştürücü, dalgaların hareketini Şekil 1.15'te gösterildiği gibi potansiyel enerjiye dönüştüren yakın kıyıdaki bir dalga güç cihazıdır.

Elektrik, geleneksel bir düşük kafa hidro türbininden daha yüksek seviyedeki suyun boşaltılmasıyla üretilmektedir.



Şekil 1.15. Üst üste gelen dalga dönüştürücü (Anonim, 2019a).

Üst üste binen dönüştürücüler ya alttan sabitlenmiş ya da yüzer bir su tutma yapısından oluşur ve dalgaların bir rampa tasarımının üzerine dökülmesini sağlamak ve gelen dalgaları deniz seviyesinin üzerine çıkarmak için genellikle yansıtıcı kollar kullanılmaktadır. Dalgalar geldiğinde, yakalanıp yükseltilmiş bir su baraj haznesinde tutulmaktadır.

Gelen suyun doğal yüksekliği üzerindeki rampadan dolayı potansiyel su enerjisi oluşturur, su denize döküldükçe türbin jeneratörüyle elektrik enerjisine dönüştürülmektedir (Anonim, 2019a).

Salınımlı su kolonu cihazları ve üst üste gelen dalga konvertörleri ile karşılaştırıldığında, üst üste binen konvertörler, düşük güç çıkışına sahiptir ve sadece derin su kıyı şeridi ve düşük gelgit aralığı için dizayn edilmiştir. Her ne kadar bazı yüzer açık deniz yakalama cihazları sınırlamaları çözmek için geliştirilmiş olsa da, yeterli su gücüne güvenilmektedir. Gelgitlerin kuvvetleri ve kuvvetli fırtınalar gibi sert hava koşullarının testine dayanması gerekmektedir.

Bakım ve onarım, jeneratörün düşük verimliliğine rağmen sadece % 30 ile maliyeti artırabilmektedir. Bununla birlikte, bu sistemin temel avantajı, yeterli suyu depolayana kadar güç ürettiği için basit bir sistemdir (Cai, 2017).

## 1.9. Piezoelektrik Etki

Piezoelektrik etki, bazı özel maddelerin mekanik strese bağlı elektrik üretimini ifade etmektedir. Piezoelektrik kelimesi Yunancada Piezein kelimesinden gelmektedir. Piezein kelime anlamı ise sıkıştırmak baskı uygulamak demektir (Uyar, 2016). Elektrik kelimesi ise Yunancada amber (kehribar) demektir. Amber ayrıca bir elektrik yük kaynağıdır (Püsgül, 2018).

Piezoelektrik olayı 18.YY'da Fransız fizikçiler Jacques ve Pierre Curie tarafından keşfedilmiştir. İlk olarak kuvars ve bazı kristallere uygulanan basıncın belirli bir malzeme üzerinde elektrik yükü oluşturduğunu fark edip ve bu sayede piezoelektrik etki hakkında ilk bulguları edindiler. Daha sonra bu garip ve bilimsel olayı piezoelektrik etkisi olarak tanımladılar.

Curie kardeşler bu olayın hemen ardından ters piezoelektrik etkiyi de keşfetmişlerdir. Kristal kabloları elektrik alanına maruz bırakıldığında, elektrik alanı kristal kabloların malformasyona veya bozulmasına sebep oldu ve bununla birlikte şimdilerde ters piezoelektrik etkisi olarak adlandırılan durumu doğrulamış oldular (Püsgül, 2018).

Piezoelektrik olayı için söylenebilecek en önemli özelliklerinden bir tanesi çift yönlü olma özelliğidir. Piezoelektrik madde hem direk piezoelektrik etki (yani maddeye baskı uygulandığında elektrik üretmesi), hem de ters piezoelektrik etki (elektrik alanı oluştuğunda ise baskı üretmesi) gösterebilmektedir.

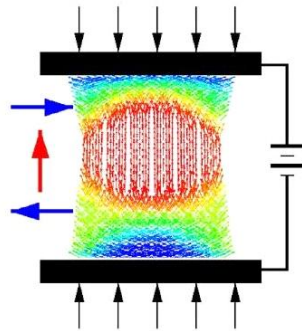
Piezoelektrik malzemeler stres uygulandığında, madde içerisinde pozitif ve negatif kutuplar oluşur (Şekil 1.16). Bu da büyük bir elektrik alanı oluşturur. Daha sonra oluşan bu elektrik alanı maddeyi ya esnetir ya da sıkıştırır.

Piezoelektrik nedir sorusuna kısaca cevap verilecek olursa mekanik titreşim ile elektrik üretmektir denilebilir (Uyar, 2016).

Piezoelektrik enerjisi, titreşim gibi mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürdüğü iyi bilinmektedir. Tekniğin diğer enerji toplama tekniklerine kıyasla bazı avantajları vardır. Öncelikle, piezoelektrik seramikler ve iletken elektrotlardan oluşan çok basit bir yapıya sahiptir. Ayrıca, ortam titreşimi olduğunda, çalışma frekans aralıkları içerisinde daima işlevseldir.

Piezoelektrik enerji hasadı, bazı güçlü avantajlar nedeniyle, çeşitli taşınabilir elektronik cihazlarda kullanım için büyük ilgi görmüştür. Özellikle, düşük güç tüketimi, pillerin ağırlığını aniden azaltabilir ve her yerde mekanik enerjinin toplanmasıyla kendi kendine çalışan cihazların daha kullanılabilir olmasını sağlayabilir.

Piezoelektrik enerji hasadı teknolojisi, diğer güneş enerjisi ve rüzgar enerjisi hasat teknolojilerine kıyasla, yüksek voltajdan, fakat sonuçta düşük akımdan kaynaklanan, sadece birkaç mikrodalga üretebilir. Bu nedenle, piezoelektrik enerji hasadı ile ilgili son durumlar, daha yüksek bir güç yoğunluğu ile optimize edilmiş bir şema içerisinde enerji toplayıcıların yapı gelişimi için piezoelektrik sabitlerinin geliştirilmesine yöneliktir. Mekanik titreşim enerjisini elektrik enerjisine çeviren piezoelektrik enerji hasadında, genellikle piezoelektrik seramik kullanır (Kim vd., 2010).



Şekil 1.16. Piezoelektrik olay kutuplaşması (Özada, 2015).

Kısacası sürekli kutuplaşmaya sahip olan iyon sal kristale (Şekil 1.16) bir basınç uygulanırsa kutuplar arası mesafe azalacak böylece bir yük birikimi oluşacaktır. Bundan dolayı da bir yük farkı meydana gelmektedir ve bunu bir iletkenle birleşmesiyle akım akmaktadır. Tabi ki aynı olay tersi içinde geçerlidir (Özada, 2015).

Günümüzde birçok elektronik cihaz piezoelektrik kullanır. Örneğin, akıllı telefonunuzdan bir ses tanıma yazılımı veya Siri gibi bir akıllı asistan kullandığınızda, konuşmakta olduğunuz mikrofon piezoelektrik kullanmaktadır.

Bilgisayar veya telefonunuzda bulunan piezokristal sesinizi ses enerjisine çevirerek elektrik sinyallerine dönüştürür. Tüm bunlar piezoelektrik etki sayesinde gerçekleşir.

Piezoelektrik olayı pek çok konuda yarar sağlayabilmektedir. Örneğin ses üretimi veya sesi tespit etmek, yüksek gerilim üretimi, ufak kilo ölçümleri, aralıksız elektrik üretimi gibi alanlarda fayda sağlayabilmektedir. Piezoelektrik etki aynı zamanda atomik özelliğiyle pek çok bilimsel aletin temelini oluşturmaktadır. Piezoelektrik kullanım alanları için örnek verecek olursak; mikroskoplar en temel kullanım alanlarından biridir.

Piezoelektrik yenilenebilir enerji kaynakları konusuna da dahil olmuş bir teknolojidir.

Piezoelektriğin geliştirilmesi ile birlikte daha çeşitli ve gelişmiş teknolojilerin keşfide artabilir. Örneğin, güçlü sonar "sonobuoy" hassas küçük mikrofonlar ve seramik ses tonu dönüştürücüler, piezoelektrikle mümkün hale gelmiştir. Günümüzde de piezoelektrik malzemelerin ve cihazların gelişiminin giderek arttığını görmekteyiz (Uyar, 2016).

### **1.10. Piezoelektriksel Davranış ve Türleri**

Mekanik bir kuvvete maruz kalındığında kristaller elektrikle yüklenir. Bu kristallerin yapmış olduğu hareketleri inceleyen Curie kardeşler piezoelektriksel davranışı keşfettiler. Piezoelektriksel davranış; iletken olmayan billurdan, yontulmuş bir levhadan belli bir doğrultuda uygulanan kuvvet ve sıkıştırma sonunda, billur levhanın iki yüzünde zıt polariteli yüklerin (+ ve -) çıkmasıyla tanımlanan bir olaydır (Doğrukol, 2002).

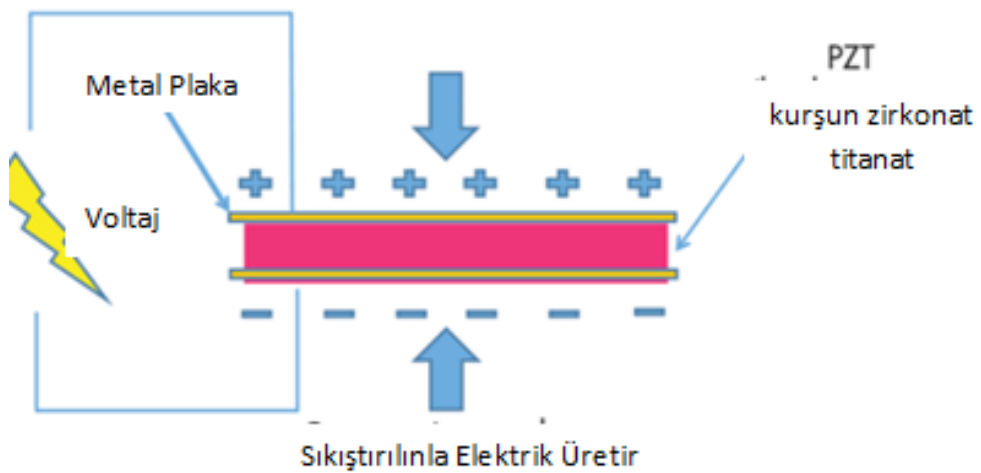
Bilindiği gibi katı maddeler, yüklü parçacıklardan oluşur ve bir katı madde içindeki negatif ve pozitif yüklü parçacıklar dengededir (yani katı madde elektriksel olarak yüksüzdür). Ancak mekanik bir yolla malzeme üzerine mekanik bir kuvvet uygulanarak, yüzey yüklerinin oluşması sağlanabilir.

Bir kristalde piezoelektrik özelliğin gözlenmesi bu yüzey yüklerinin oluşmasına bağlıdır (Anonim, 2019b). Fakat simetri özellikleri bu yüklerin oluşması için gerekli koşulları kısıtlamaktadır. Bu nedenle simetri merkezi olmayan kristaller bu iş için en uygun malzeme grubunu oluşturmaktadır (Doğrukol, 2002).

Elektriksel olarak yüksüz ve yapısal simetri merkezi bulunmayan bir kristalde uygulanan basınç artı yüklerin merkezi ile eksi yüklerin merkezinin birbirinden hafifçe ayrılmasına ve kristalin karşılıklı yüzeylerinde zıt yüklerin ortaya çıkmasına neden olur. Yüklerin bu şekilde ayrılması bir elektrik alanı oluşturur ve kristalin karşılıklı yüzeyleri arasında ölçülebilir bir potansiyel fark oluşur (Anonim, 2019b).

### 1.10.1. Doğru piezoelektrik davranış

Piezoelektrik malzemeye basınç uygulandığında elektrik üretmektedir. Şekil 1.17'de bu olay şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 1.17. Piezoelektrik malzemenin sıkıştırılması. (Anonim, 2019b).

Piezoseramik malzeme (iletken olmayan piezoelektrik seramik veya kristal) iki metal plaka arasına yerleştirilir. Piezoelektrik etkisi meydana getirebilmek için sıkıştırılacak bir malzemeye ihtiyaç vardır.

Piezoelektrik seramik malzemeye uygulanan mekanik baskı ile birlikte elektrik üretir. Şekil 1.17’de görüldüğü üzere malzemenin tüm boyutu üzerinde gerilim potansiyeli vardır. İki metal plaka piezoelektrik malzemeyi sarar. Bu metal plakalar gerilim oluşturan yükleri toplar. Bu sayede piezoelektrik etki bir minyatür pil gibi davranır ve elektrik üretir. İşte bu durum doğru piezoelektrik etki olarak adlandırılır.

Doğru piezoelektrik etkiyi kullanan cihazlar arasında mikrofonlar, basınç sensörleri, hidrofönler ve diğer algılama cihazları bulunmaktadır.

### **1.11. Piezoelektrik Malzemeler**

Piezoelektrik etki gösteren birçok doğal ve insan yapımı madde bulunmaktadır. Bazı doğal piezoelektrik malzemeler kuvars, şeker pancarı, Rochelle tuzu (rokel tuzu), berlinit, tormalin, topaz ve kemiktir (kuru kemik kristallerden dolayı piezoelektrik özellikleri göstermektedir).

Piezoelektrik etki çoğunlukla biyolojik güç sensörü olarak görülmektedir. İnsan yapımı piezoelektrik maddelere baryum ve zirkonyum titanat örnek verilebilir (Uyar, 2016).

Piezoelektrik malzemelerin çoğunlukla kullanılan tipi kurşun-zirkonyum-titanyum (PZT) piezoseramiklerdir. Piezoseramik malzemeler elektriksel etkiyi mekanik etkiye, mekanik etkiyi elektriksel etkiye dönüştüren simetri merkezi olmayan kristallerdir (Işık, 2013).

Piezoelektrik etki yaratmak için en önemli olan simetri merkezi olmayan kristaller kullanılmaktadır.

Kullanılan başlıca malzemeler:

- $PbZrO_3$ - $PbTiO_3$  alaşımı (PZT) ,
- $(Pb,La)(Ti,Zr)O_3$  alaşımı (PLZT)
- Kuartz ( $SiO_2$ )
- Turmalin
- Baryum Titanat ( $BaTiO_3$ )
- Çinko Oksit ( $ZnO$ )
- PVDF (Poli-vinilidin-klorür) (Özada, 2015).

### 1.11.1. PZT seramik (Kurşun zirkonat titanat)

Kurşun-zirkonyum-titanyum (PZT) piezoseramikler, son derece kırılğan bir yapıya sahiptir. PVDF'den daha pahalıdır. Mekanik enerjinin yüzde 80'ini elektriğe dönüştürebilen ultra verimli piezoelektrik malzemedir.

PVDF'den daha yüksek piezoelektrik gerilim sabitine sahiptir. PVDF'den daha fazla gerilim dönüşüm değerine sahiptir (Şekil 1.18).



Şekil 1.18. PZT Seramik (Anonim, 2018b).

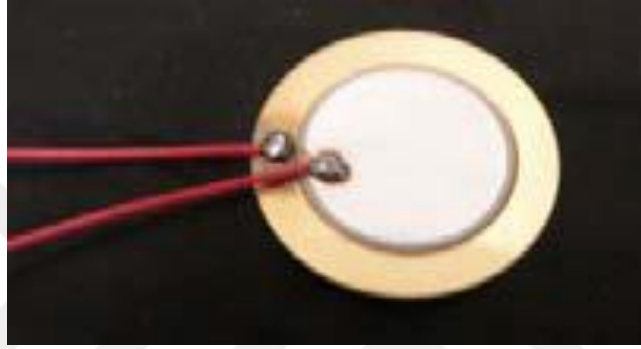
### 1.11.2 Davul tipi piezoelektrik malzemeler

PZT seramik malzeme ile üretilmiş davul tipi piezoelektrik malzemeler, diğer türlerine göre düşük güç üretmektedir.



Çeşitli kaynaklardan gelen ortam titreşimlerini kullanarak Bluetooth, GPS modülleri, mikrodenetleyiciler ve düşük güç sensörleri gibi mikroelektronik cihazlara güç sağlamak için kullanılabilir faydalı elektrik enerjisi üretmektedir.

Davul tipi piezoelektriklerin üretim süreci ucuz, kolay ve hızlıdır. Oldukça sağlamdır ve bu nedenle çeşitli yapılarda, zeminlerin altında, yollarda vb. kolaylıkla kullanılabilir (Şekil 1.19). ucuz ve kolay temin edilebilir olması nedeniyle bu tez çalışmasında davul tipi piezoelektrik malzeme kullanılmıştır.



Şekil 1.19. Davul tipi piezoelektrik (Elhalwagy vd., 2017)

### 1.12. Piezoelektriğin Kullanım Alanları

Piezoelektrik materyallerin en temel kullanım şekillerinden biri kişisel enerji üreteçleri olarak kullanılmalarıdır. Piezoelektrik materyaller, telefonlara, MP3 oynatıcılara yetecek kadar enerji üretebilmektedir. Ayakkabının tabanı piezoelektrik maddelerden üretilebilir ve atılan her adımda elektrik üretimi sağlanabilir. Bu sayede kişisel elektronik cihazlarda kullanılabilmesi için bataryalarda depolanabilir veya doğrudan kullanılabilir (Işık, 2013).

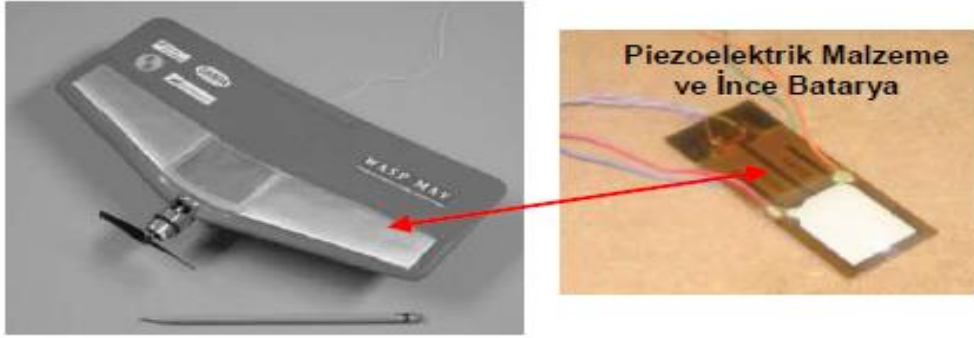
Radyo vericilerinin frekans kontrolleri, telefon iletişimi uygulamalarındaki dalga filtrelerinde kullanılmaktadır (Önal, 2016).

Bir başka yeni düşünce ise sesin yankılanması ile oluşan titreşimlerin piezoelektrik materyaller aracılığı ile sese dönüştürülmesinin sağlanmasıdır. Şöyle ki araçta radyo dinlerken, dışarıda parkta otururken veya herhangi bir şey yaparken ses elektriğe çevrilebilmektedir (Işık, 2013).

Pikap kafalarının iğnelerinde ve mikrofonlarda transdüktör olarak kullanılır (Önal, 2016).

Günümüzde alternatif enerji kaynakları önemli bir konu olarak tartışılmaktadır. Bu kapsamda, piezoelektrik malzemeler çalışma prensipleri dolayısıyla alternatif enerji kaynağı olarak düşünülebilirler. Özellikle uygulandıkları yapılar göz önünde bulundurulsa hasat edilen enerji, uygulanan yapının tüm enerji ihtiyacını karşılayabilir. Bu yapılara örnek olarak mini insansız hava araçları ve yapısal sağlık izlenim sensörleri verilebilir (Işık, 2013).

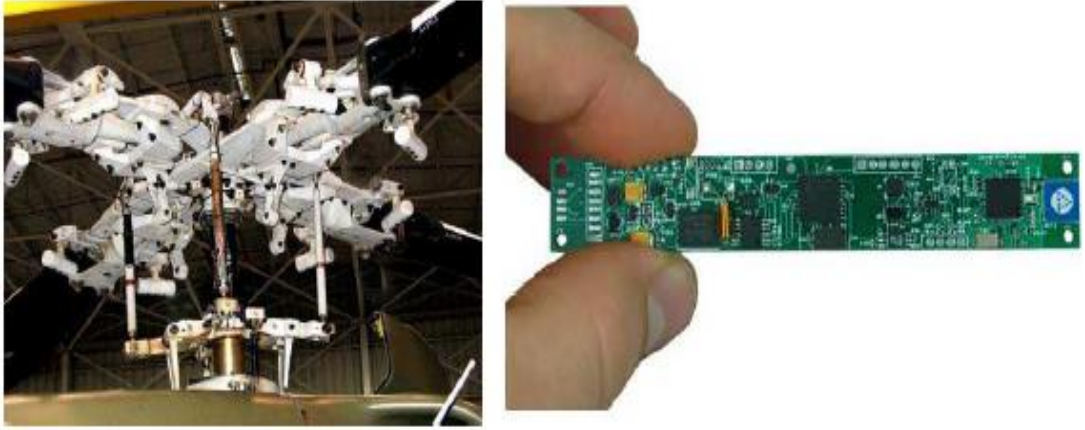
Şu anki teknoloji ile büyük çaptaki hava araçlarının enerji ihtiyacını karşılamak pek mümkün gözükme de mini boyutlardaki hava araçlarının enerji ihtiyacı bu akıllı yapılar aracılığı ile karşılanabilir. Bu duruma örnek olarak ABD’deki bir proje kapsamında AeroVironment Inc. tarafında tasarlanan “WASP Mini UAV” verilebilir (Anonim, 2019c). Bu mini insansız hava aracının kanatlarında bulunan piezoelektrik malzemeler ve ince bataryalar sayesinde gerekli olan enerji sağlanmaktadır (Şekil 1.20).



Şekil 1.20. Mini WASP UAV ve Akıllı Yapı (Anonim, 2019c).

Ayrıca yapısal sağlık kontrolü amacıyla kullanılan sensörlerin enerji ihtiyacı da piezoelektrik malzemeler kullanarak sağlanabilir. Özellikle bu sensörlerin uygulandıkları yerler sebebiyle kablo kullanılmamaktadır ve enerji ihtiyaçları piller tarafından sağlanmaktadır. Bu pillerin dönemsel olarak kontrol edilip, sistemin düzgün ve devamlı çalışması amacıyla değiştirilmesi gerekmektedir.

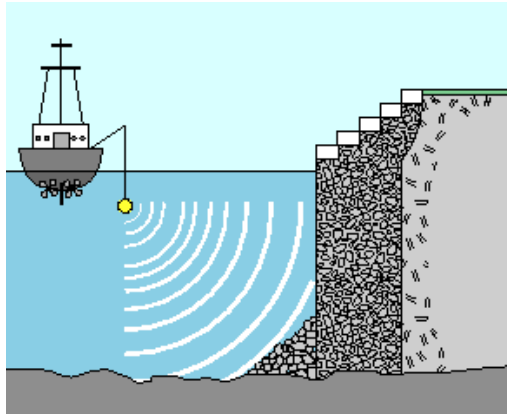
Eğer bu piller ile birlikte piezoelektrik enerji hasatı sistemleri de kullanılırsa, yapısal sağlık kontrolü için kullanılan sistemin güvenilirliği ve devamlılığı da sağlanmış olur. Bu konuya örnek olarak helikopterin ana rotoruna yerleştirilmiş olan yapısal sağlık kontrolü sisteminin enerjisi piezoelektrik enerji hasatı (Şekil 1.21) ile karşılanmaktadır (Arms vd. 2008).



Şekil 1.21. Yapısal sağlık kontrolü sistemi (Arms vd. 2008).

Piezoelektrik malzemelerden oluşan yapısal bileşenlerin geliştirilmesi, gelişmiş havacılık araçlarının performansını iyileştirmek için büyük bir potansiyel sunmaktadır.

Piezoelektrik elementler ayrıca sonar dalgalarının tespitinde ve oluşumunda da kullanılır (Şekil 1.22).



Şekil 1.22. Piezoelektrik malzemelerin sonar sisteminde kullanımı (Anonim,2020b).

Piezoelektrik enerji hasatı sistemleri sadece havacılık yapılarında değil enerji ihtiyacı duyan ve titreşim üreten tüm sivil ve askeri yapılarda kullanılabilir.

Örneğin, askeri bir personelin sırt çantası için tasarlanmış bir piezoelektrik enerji hasatı sistemi (Şekil 1.23) sayesinde operasyon esnasında oluşan titreşimler sayesinde enerji sağlanabilir (Avşar ve Şahin, 2012) ve bu enerji telsizin pilini şarj etmek amacıyla kullanılabilir.



Şekil 1.23. Sırt çantası için tasarlanan piezoelektrik enerji hasatı sistemi (Avşar ve Şahin, 2012).

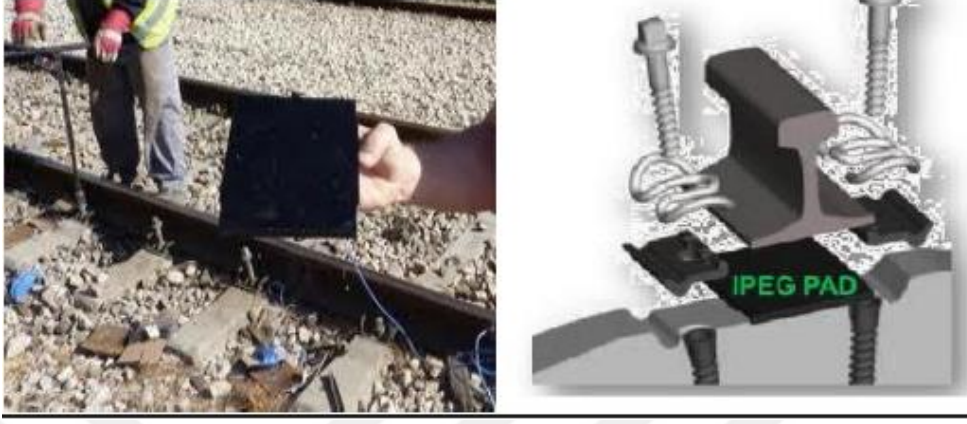
Yüksek voltajlı elektrik türbinlerinin gerilim üretmek amacı ile rotorun sargılarının sarıldığı metallerde kullanılır (Avşar ve Şahin, 2012).

Asfaltın altında beton zemin üzerine eklenen piezo jeneratörlerin üzeri bitümlü tabakayla kaplanarak korumaya alındıktan sonra üzeri asfalt ile kaplanır ve 30 yıla uzanan jeneratör ömrü sağlanır. Üretilen elektriğin şebekeye verilmesi ya da bataryalarda saklanması mümkün olmaktadır. Saatte 500 ağır vasıta aracın geçtiği 1 km uzunluğunda yolda 200 kWh/h elektrik üretimi mümkün olacaktır (Avşar ve Şahin, 2012) (Şekil 1.24).



Şekil 1.24. Karayollarındaki uygulamalar (Avşar ve Şahin, 2012).

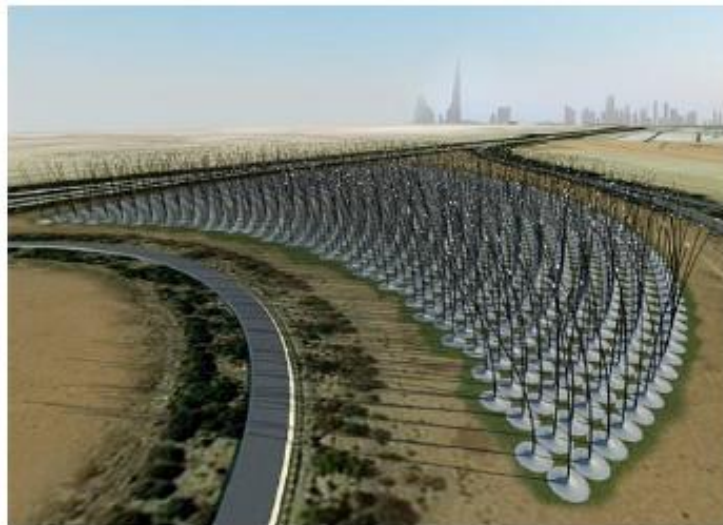
Demiryolu traverslerinde sadece titreşim izolasyonu için eklenmiş lastik tamponların değişimi ile elektrik üretimi ve trenlerin online yük- hız- yer takibi mümkün hale gelir (Avşar ve Şahin, 2012) (Şekil 1.25).



Şekil 1.25. Piezoelektrik malzemenin demiryollarındaki uygulamaları (Avşar ve Şahin, 2012).

Rüzgar türbinlerine alternatif olarak Şekil 1.26’da yapımı düşünülen sistemin amacı, bitki sapına benzeyen devasa sapların rüzgarda salınım yapmasıyla elektrik üretilmesidir.

Bu sistemin temeli ise piezoelektrik prensibine dayanmaktadır. Bu sapların tepesine yerleştirilen LED’lerin parlaklığı rüzgarın hızına göre değişmektedir (Avşar ve Şahin, 2012) .



Şekil 1.26. Piezoelektrik etkiden yararlanılarak rüzgardan elektrik üretimi görseli (Avşar ve Şahin, 2012).

Direkt ve tersine çevrilmiş piezoelektrik etkilerinden ve ayrıca piroelektrik olaylardan yararlanarak, piezoelektrik kompozit malzemeler çeşitli şekil, titreşim ve gürültü kontrol uygulamalarında kullanılabilir.

Bu potansiyel performans avantajları, piezoelektrik malzemelerin davranışını karakterize etmek için hem analitik hem de deneysel yöntemlerin kapsamlı bir şekilde geliştirilmesiyle sonuçlanmıştır.

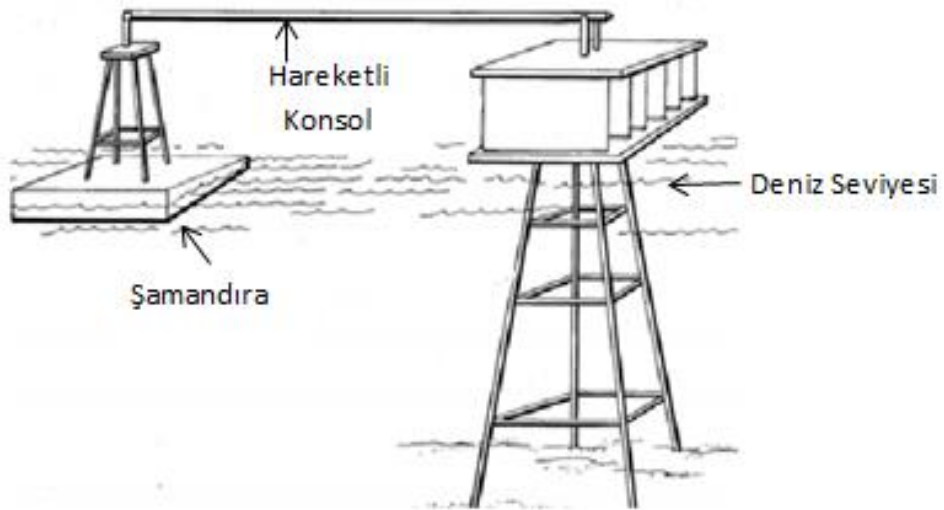
Piezoelektrik malzemelerin çeşitli elastik, dielektrik, piezoelektrik ve piroelektrik özellikleri, bileşime ve üretim tekniğine bağlı olarak sıcaklık değişimlerinden farklı şekilde etkilenir.

Piezoelektrik malzemeler ayrıca malzemenin piezoelektrik özelliklerini kaybettiği Curie sıcaklığı adı verilen karakteristik bir sınırlama sıcaklığına sahiptir (Hoo Jun Lee ve Dimitris, 1997).

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

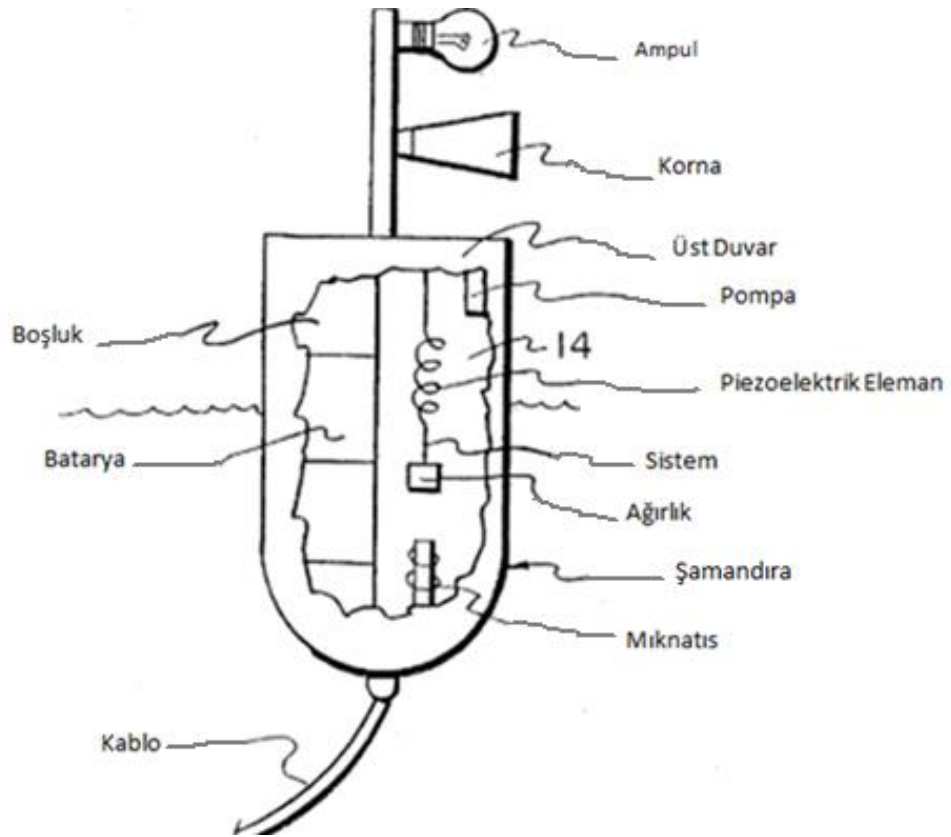
Burns (1987), piezoelektrik malzeme elemanları kullanarak su kütleleri üzerindeki yüzey dalgalarından elektrik enerjisi elde etmek için bir sistem geliştirmiştir. Enerji verimi işleminin etkinliğini arttırmak, dalgalardan enerji çıkarmak ve aktarmak amacıyla kullanılan sistemin çıkış empedansının piezoelektrik elemanın giriş empedansına büyük ölçüde eşit olması için bir enerji transfer düzenlemesi sağlanmıştır. Buluşun bir düzenlemesinde, dalga enerjisi sistemi, yüzey dalgalarından yararlanmak, yukarı ve aşağı hareket sağlamak için bir şamandıra kullanılmıştır. Şamandıra, konsola doğrudan tepki vermek ve konsolu alternatif olarak germek için bir piezoelektrik elemana mekanik olarak bağlanmıştır (Şekil 2.1).

Piezoelektrik elemanların, su kütlelerinin yüzey dalgalarının mekanik enerjisini elektriğe dönüştürmek için kullanımı genel olarak bilinmektedir. Bununla birlikte, enerji üretimi piezoelektrik elemanların yetersiz kullanımı nedeniyle pratik değildir. Bu nedenle, nispeten düşük bir maliyetle sadece nispeten küçük miktarda elektrik gücü elde edilir. Mevcut buluş, piezoelektrik malzeme elemanlarının hem enerji üretim işleminin etkinliğinde hem de kullanılan düzenlemelerin basitliği ve düşük maliyetinde daha iyi kullanılmasını sağlamaktadır.



Şekil 2.1. Piezoelektrik malzemeler ile okyanus dalgası enerji dönüşümü (Burns, 1987).

Epstain ve Taylor (1996), bu çalışmada şamandıraların işlevselliğinden faydalanarak dalga enerjisinden elektrik üretmek amaçlanmıştır. Şamandıra içerisine bir sistem yapılmıştır. Yapılan sistemde elastiklik özelliklere sahip bir piezoelektrik malzeme kullanılmıştır. Piezoelektrik malzeme şamandıra içerisinde dikey olarak konumlandırılmış bir yay görevi yapmaktadır. Yayın alt ucuna bağlanmış olan ağırlık bulunmaktadır (Şekil 2.2). Şamandıranın dalga hareketine maruz kaldığındaki kinetik enerji ile hareket etmektedir. Hareket esnasında esneme ve gerilme kuvvetlerine maruz kalan piezoelektrik yay elektrik enerjisi üretimi sağlamaktadır. Burada seçilen piezoelektrik yay dalganın frekansı göz önüne alınarak seçilmiştir.



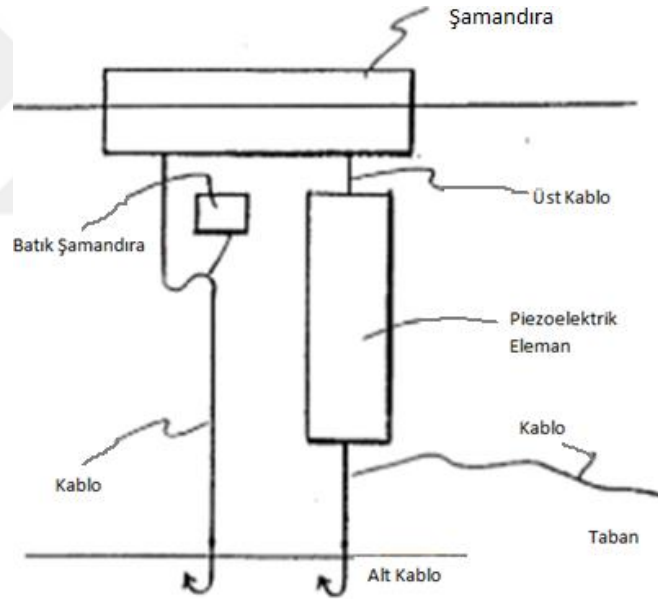
Şekil 2.2. Ağırlıklı, esnek piezoelektrik elemanlar ile elektrik enerjisi üretimi (Epstain ve Taylor, 1996).

Carroll (1996), piezoelektrik güç üreten bir sistem geliştirmiştir. Geçen dalgaların kinetik enerjisinden elektrik üretmek için dalgaların yukarı aşağı hareketlerinden yararlanılarak bir su kütesinde kullanmak amacıyla bir şamandıra yapılmıştır. Bir piezoelektrik güç elemanı, şamandıra ve su tabanı arasında elastik olarak askıya alınmış ve şamandıranın dikey hareketlerine cevap olarak değişken dikey gerilmelere maruz kalmaktadır.



Piezoelektrik elemanın, alışılmadık derecede büyük dalgalara dayanması ve yıkıcı olabilecek aşırı zorlanmalara karşı korunması için, büyük ölçüde piezoelektrik elemandan daha sert olan bir hareket sönümleyici eleman kullanılmıştır.

Bir uygulamada, stres emici eleman şamandıra ve sağlam bir alt çapa arasında uzanan güçlü, esnek bir kablodur (Şekil 2.3). Kablo, piezoelektrik elemanın dikey uzaması önceden seçilmiş bir miktara ulaşana kadar gevşek olacak şekilde ayarlanmıştır. Bu sırada kablo, geçen dalgaların yüksekliğinden bağımsız olarak, şamandıranın dikey olarak yükselişini büyük ölçüde veya önemli ölçüde sınırlamak için gergin hale gelmektedir. Mevcut buluş bu bağlantı kesme probleminden kaçınır ve sadece sistemi aşırı gerilmelere karşı korumaya değil, koruma sistemi çalışırken aşırı yüksek dalga dönemlerinde bile sistemin sürekli kullanılmasına ve güç toplanmasına izin verecek şekilde hizmet eder.



Şekil 2.3. Piezoelektrik jeneratör korumalı sistem tasarımı (Carroll, 1996)

Roundy vd. (2003), potansiyel enerji toplama teknolojilerinin ve geleneksel enerji kaynaklarının kapsamlı bir incelemesi için bir çalışma yapmışlardır. Potansiyel bir güç kaynağı olarak ortak ev ve ofis ortamlarında meydana gelen düşük seviyeli titreşimleri derinlemesine incelemiştir. Bu makalenin amacı, titreşimlerin dönüştürülmesinin ortam gücünü atmanın en iyi veya çok yönlü yöntemi olduğunu değil, titreşimlerin olduğu uygulamalar için uygulanabilir bir güç kaynağı olarak potansiyelini incelemektir.

Kapasitif Micro Electro Mechancial Systems (MEMS) ve piezoelektrik dönüştürücüler için özel optimize edilmiş tasarımlara yol açan farklı dönüşüm mekanizmaları araştırılmış ve değerlendirilmiştir. Simülasyonlar piezoelektrik dönüşümden kaynaklanan potansiyel güç yoğunluğunun önemli ölçüde yüksek olduğunu göstermektedir.

Hazır bir piezoelektrik bimorf kullanarak yapılan deneyler, piezoelektrik dönüştürücüler için modellerin doğruluğunu kanıtlamıştır. PZT bimorfu ile  $70 \text{ mW/cm}^3$  lük bir güç yoğunluğu gösterilmiştir.

Bu makalede sunulan analiz, piezoelektrik dönüştürücülerin birim hacim başına kapasitif dönüştürücülerden daha fazla güç dönüştürebileceğini göstermektedir. Piezoelektrik dönüştürücüler de ayrı bir voltaj kaynağı gerektirmedikleri ve dikkate alınan titreşim kaynakları için çıkış voltajı 3–10 V aralığında olduğu için uygundur. Kapasitif dönüştürücüler ayrı bir voltaj kaynağı gerektirir ve birim hacim başına daha fazla güç üretirler. Tartışılan üç tip kapasitif konvertörden, düzlem içi boşluk kapatma kapasitörü, sağlamlığı ve yine de yüksek güç dönüşüm potansiyeli nedeniyle en çekici tasarım topolojisi olarak görünmektedir.

Sodano vd. (2004), QP40N, bimorf aktüatörünü kullanarak sistem geliştirmişlerdir. Hızlı paket aktüatörü, bir kapton ve epoksi matrisine gömülü dört piezoseramik yonga plakasından yapılmıştır.

Modellerin, değişken frekans ve genlikte enine titreşimlere maruz kaldığında bu cihazdan üretilen güç miktarını tahmin etme yeteneğinin doğruluğunu kanıtlamak amacıyla deneyler yapılmıştır.

Güç toplama işlemini gerçekleştirmenin bir yöntemi de onları çevreleyen ortamın titreşim enerjisini elektrik enerjisine dönüştürebilen PZT malzemelerini kullanmaktır. Bu elektrik enerjisi daha sonra diğer cihazlara güç sağlamak için kullanılabilir veya daha sonra kullanılmak üzere depolanabilmektedir. Bu teknoloji, kablosuz ve MEMS teknolojisindeki son gelişmeler nedeniyle, sensörlerin uzak konumlara yerleştirilmesini ve çok düşük güçte çalışmasını sağlayarak artan bir ilgi görmüştür.

Güç toplama cihazlarına olan ihtiyaç, bu kablosuz elektronikler için güç kaynağı olarak pillerin kullanılmasından kaynaklanmaktadır. Pilin sınırlı bir ömrü olduğundan, enerjisi söndükten sonra sensörün geri kazanılması ve sensörün çalışmasına devam etmesi için pilin değiştirilmesi gerekir. Yalnızca pili değiştirmek için sensörlerin kullanılması, kablosuz yapıları zor yerlere yerleştirilmesinden dolayı pahalı bir iş haline gelebilir. Bu nedenle, pilin ömrünü uzatmak veya ideal olarak ömrü boyunca sensöre sonsuz bir enerji sağlamak için bu sensörlerin etrafındaki enerjiyi toplama yöntemleri uygulanmalıdır.

Bir konsol kirişinin bağlı PZT elemanları ile titreşimi yoluyla üretilen güç miktarını tahmin etmek için bir model geliştirmişlerdir. Modelin türetilmesi, çeşitli sınır koşulları veya PZT yamalarının düzenine sahip bir kirişe uygulanması ile sağlanmıştır. Model, deney sonuçları kullanılarak doğrulanmış ve uyarma frekansı yük direncinden bağımsız olarak doğru olduğu kanıtlanmıştır. Ek olarak, modelin doğrulanması, modelin sağlam olduğunu ve çeşitli farklı mekanik koşullara uygulanabileceğini gösteren karmaşık bir PZT düzeni ve homojen olmayan bir malzeme ışını içeren bir yapı üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Arroyo vd. (2012), piezoelektrik ve elektromanyetik titreşim enerjisi hasat sistemleri için normalize edilmiş bir model tasarlamışlardır. Elektromanyetik ve piezoelektrik sistemlerin güç ve güç yoğunluğu cinsinden karşılaştırmasını yapmışlardır.

Kullanılan normalizasyon, herhangi bir jeneratörün üç karakteristik parametresini öne sürer bunlar bağlantı katsayısı, kayıp katsayısı ve mekanik kalite faktörüdür. Normalize edilmiş hasat gücünün evrimini teorik olarak bu parametrelerin bir fonksiyonu olarak incelemişlerdir.

DeneySEL sonuçlar ve bir bibliyografik çalışma ile piezoelektrik ve elektromanyetik jeneratörler için tipik kuplaj ve kayıp katsayıları değerlerinin incelemesini yapmaktadır. Piezoelektrik jeneratörler düşük kuplaj ve düşük kayıp katsayılarına sahipken, elektromanyetik jeneratörlerin yüksek kuplaj ile telafi edilen yüksek dirençli kayıpları mevcuttur.

Her iki jeneratör için de bu çift parametrelerle neredeyse aynı normalize edilmiş güç toplanabilmektedir. Son olarak, ölçeklendirme etkisi araştırılmıştır ve bir elektromanyetik jeneratörün güç yoğunluğunun, yaygın olarak kabul edildiği için hacmi ile orantılı olarak azalmadığı gösterilmiştir.

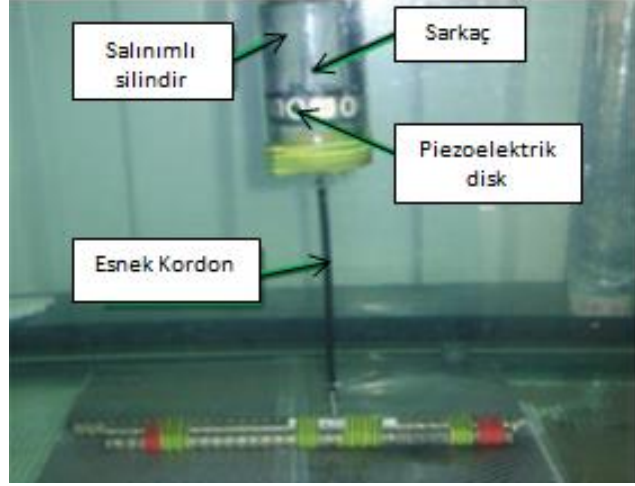
Toma vd. (2013), deniz suyu akışından yararlanarak piezoelektrik malzeme ile elektrik enerjisi üretimi sağlanmıştır. Esnek bir kordonla deniz tabanına sabitlenecek olan bir sistem tasarımı yapılmıştır. Silindirin içine, su akışı sırasında silindir sallanırken sarkaçtan etkilenecek elektrik enerjisi üretecek birkaç disk piezoelektriği yerleştirilmiştir (Şekil 2.4).

Açık deniz sistemlerinin marker bazlı dinamik analizinden elde edilen kinematik veriler, esnek kablo ile deniz tabanına tutturulmuş silindirin karakterizasyonunda kullanılan yöntemdir. Bu sonuçları kullanarak, enerji toplama prototipi, OrcaFlex simülasyonlarında görülen silindirin kinetik hareketini simüle edebilen batık pompalı akımlarla su tankında test edilmiştir. Bir simülasyon programında test yapılmış olup üretilen enerji değerleri belirlenmiştir.

Esnek bir kordonla deniz tabanına sabitlenecek olan sistemin tasarımında düşük maliyetli disk piezoelektrik elemanlarını kullanarak sualtı düşük tüketim cihazlarının tedarik edilmesi için yeni bir fikir önerilmiş ve çalışılmıştır. Sistem, piezoelektrik malzemeler kullanılarak yüzey dalgaları ve derinlerdeki dalgaların ters sarkaç gibi hareket ederek enerjisi, esnek kordonlarla deniz tabanına tutturulmuş pozitif yüzdürme özellikli gövdelerin salınım hareketi yoluyla üretmektedir.

Sarkacın hareketi tarafından üretilen darbelere maruz kalan piezoelektrik bileşenler, deniz hareketlerinin getirdiği mekanik enerjisi toplayan bir elektrik jeneratörü oluşturur.

Önerilen elektronik hasat sistemine sahip bir prototip üretilmiş ve test edilmiştir. Prototipin ortalama güç çıkışı, daha fazla optimizasyonla önemli ölçüde artırılabilen  $2.2 \pm 0.3 \mu W$ 'dır.

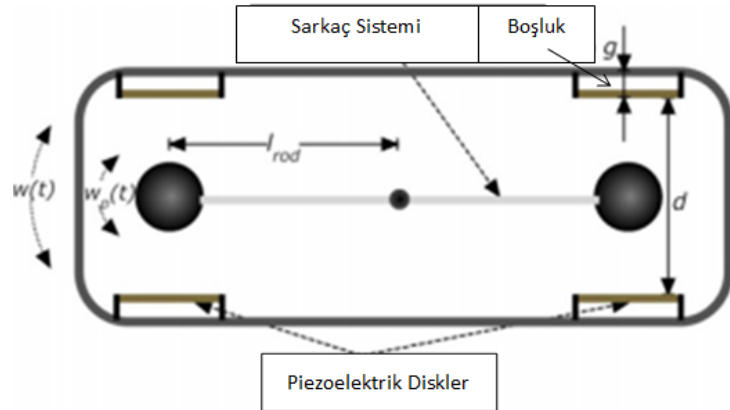


Şekil 2.4. Enerji toplayıcı sığ su simülatorüne monte edilmiş görüntüsü (Toma vd., 2013).

Vinol vd. (2013), disk piezoelektrik dalga üretici tasarlamaşlardır. Düşük maliyetli disk piezoelektrik elemanlarını kullanan derin deniz için tasarlanmış bir elektrik enerjisi hasat cihazıdır. Tasarımın temel yapısı Şekil 2.5'te gösterilmektedir.

Dört özdeş piezoelektrik disk, kasaya tutturulup ve merkezlerinde iki küresel kütle tarafından çarpması sağlanmaktadır. İki kütleli birbirine bağlamak için denge benzeri bir fiziksel sarkaç tasarlanmıştır.

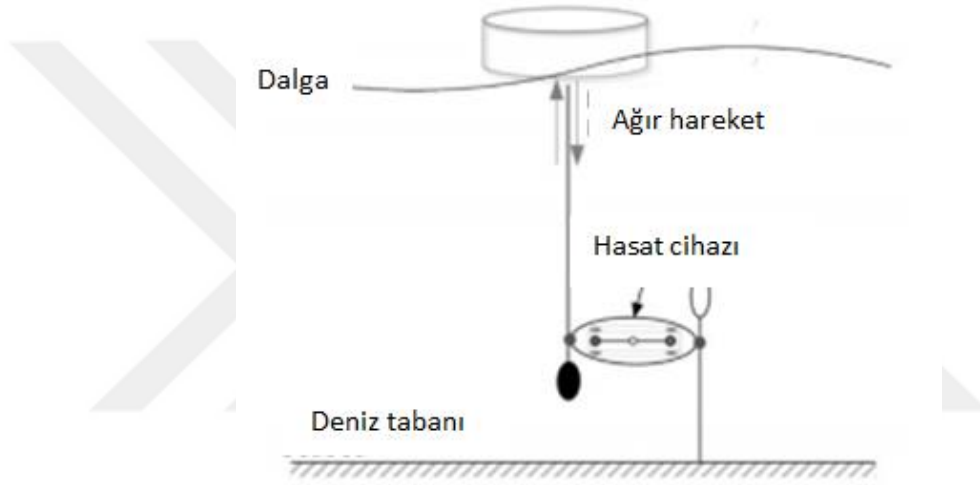
Disk piezoelektrik elemanlar, 1.5 cm çapında ve birkaç kHz'lik bir yanıt frekansına sahip olan kurşun zirkonat titanat (PZT) malzemesinden yapılmıştır. Dalga hareketiyle ilgili kinetik ve potansiyel enerjiden etkilenen çıktı verimliliğini en üst düzeye çıkarmak için iki farklı bağlama yapılandırması geliştirilmiştir.



Şekil 2.5. Disk piezoelektrik dalga üretici dönüştürücü sistemi (Vinol vd., 2013)

Şekil 2.6'da, yüzer bir cismin dikey hareketinden faydalanan deniz ağırlığının hareketi için demirleme yapılandırmaları gösterilmiştir. Enerji dönüştürücü sistem, şamandıraya, muhafazanın yukarı ve aşağı hareketini sağlayan bir bağlama hattı ile bağlanmıştır.

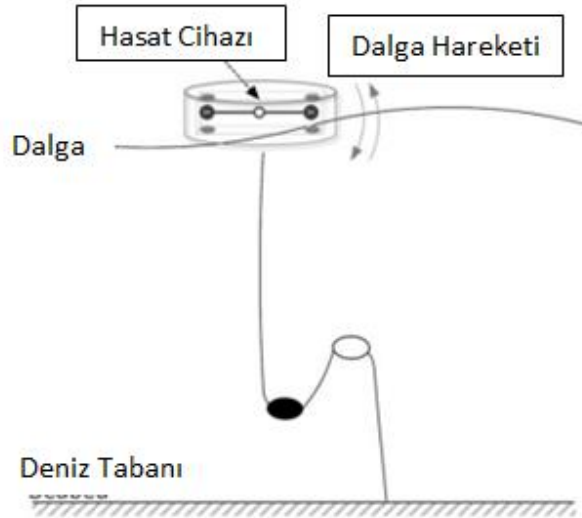
Dalga tarafından oluşturulan çekme kuvveti sarkaç sistemi ile birlikte küresel kütleler serbestçe sallanmaya başlar ve bu da piezoelektrik disk üzerinde sürekli etkilere neden olmaktadır. Kutunun diğer tarafında bir çekme kuvveti oluşturmak için, bağlama hattının karşı tarafında kayan gövdeli ağır bir ağırlık eklenmiştir.



Şekil 2.6. Ağır hareket için demirleme yapılandırmaları (Vinlol vd., 2013).

Dalgalar şamandırayı gergin hale getirdiğinden salınan adım hareketi hasat cihazında meydana gelmektedir. Şekil 2.6.'da gösterilen önceki konfigürasyonun aksine, muhafazanın kendisi, Şekil 2.7'de gösterildiği gibi doğrudan bir demirleme hattıyla deniz tabanına takılan bir şamandıra olarak tasarlanmıştır.

Bu durumda, sarkaç sistemi, dalga hareketine karşı ters bir hareket yapmaktadır. Mahfazanın yerçekimi eksenini, hasat düzeneğinin açısal bir yer değiştirmesini oluşturan dalga yüzeyine dik durmuş ve mahfaza ile küresel atalet arasındaki kütle farkı, kütlelerin gecikmiş bir hareketine yol açmıştır. Tam bir dalga periyodunda, piezoelektrik elemanlar, cihazın kendisinin salınımlı hareketi nedeniyle küresel kütlelerden etkilenmiştir.



Şekil 2.7. Deniz yüzeyi hareketi için yapılandırmaları bağlama (Vinlol vd., 2013).

Hasat cihazının dönüşüm etkinliği, daha ağır küresel kütlelerde bile sadece % 0.8 dir. Çıktı verimliliği 23 cm dalga yüksekliğinde ve rüzgar hızları 0-3 m/s arasında değişirken yalnızca % 0.7 ile % 0.8 arasındadır. 24 saatlik bir deney sırasında toplanan toplam elektrik enerjisi miktarı 435 Mj'dir.

Rammohan vd. (2014), piezoelektrik etkiye dayanan güç hasat makineleri, ortam titreşimlerinden enerji sağlama konusunda umut verici olduğunu öne sürmüşlerdir. Bu çalışmada, Polivinilidiflorür (PVDF) konsolları şeklindeki piezoelektrik bimorf rezonatörler incelenmiş ve düşük frekanslı titreşimlerden üretilen gücü en üst düzeye çıkarmak için optimum terminal kombinasyonuna sahip bir dizide kullanmışlardır. Pasif sandviç tabakasının kalınlığı ve her filmdeki kutuplama yönünün, PVDF bimorfundan üretilen toplam gücün belirlenmesinde çok önemli olduğunu göstermişlerdir.

Deneysel olarak, PVDF filminden yapılmış ve 30 ila 40 Hz arasında rezonans gösterecek şekilde boyutlandırılmış bimorf konsollar, benzer kutuplu ve ters kutuplu konfigürasyonlarda kullanılmış ve çıkışları 1 M $\Omega$  yük direnci boyunca voltaj olarak ölçülmüştür. Benzer şekilde kutuplanan bimorf, çıkış voltajını iki katından fazla artırarak ters kutuplu konfigürasyondan daha iyi performans göstermiştir.

Bir diziye paralel bağlanan ve 0,8 giriş hızıyla 33 Hz'de rezonansa giren bu tür üç cihazla yapılan deneyler 2,8  $\mu$ W güç üretimi ile sonuçlanmıştır. Bu sonuç, düşük elektromekanik kuplaj katsayısına ( $k_e$ ) rağmen enerji hasat rezonatörleri için aday bir malzeme olarak PVDF'nin vaadini göstermektedir.

PVDF için düşük maliyetli olması ve üretim kolaylığı malzemeyi cazip hale getirmektedir. 100 Hz içindeki piezoelektrik hasatçının normalize edilmiş gücü, elektromanyetik hasatçının gücü ile karşılaştırılmıştır. Ek olarak, piezoelektrik malzemelerin kapladığı hacim, elektromanyetik jeneratörlerin hacminden daha küçük ve güç yoğunluğu daha fazla olduğu sonucuna varmışlardır. Piezoelektrik dönüşüm, bu nedenle, 100 Hz altındaki frekanslarda enerjiyi toplamak için daha iyi bir hasat mekanizmasıdır.

Xie vd. (2014) piezoelektrik etkilerle, su parçacıklarının enine dalga hareketinden bir okyanus dalgası enerji toplayıcısı geliştirilmiştir. Makine, piezoelektrik yamalar ile tutturulmuş ve dikey bir dikdörtgen sütun üzerine sabitlenmiş iki yatay konsol plakasından yapılmıştır (Şekil 2.8).

Enerji hasadı sürecini tanımlamak için, Airy lineer dalga teorisine (Küçük genlikli dalga teorisi) ve elastik ışın modeline göre piezoelektrik yamaların çıkış yükünü ve gerilimini hesaplamak için bir matematiksel model geliştirilmiştir. Eğer dalga yüksekliği; dalga boyu ve su derinliği ile mukayese edildiğinde oldukça küçükse, matematiksel ifadeler lineer formda tariflenebildiğinden literatürde bu tip dalgalar lineer dalga veya Airy dalga olarak isimlendirilmektedir. Okyanus derinliği, okyanus yüzeyinin altındaki hasat yeri, konsolların uzunluğu, dalga yüksekliği ve dalga uzunluğunun oranı gibi birimlerin değerleri bize net bir sonuç vermez bu sebepten piezoelektrik yamalardan üretilen gücün kök ortalama karesi (RMS) alınır.

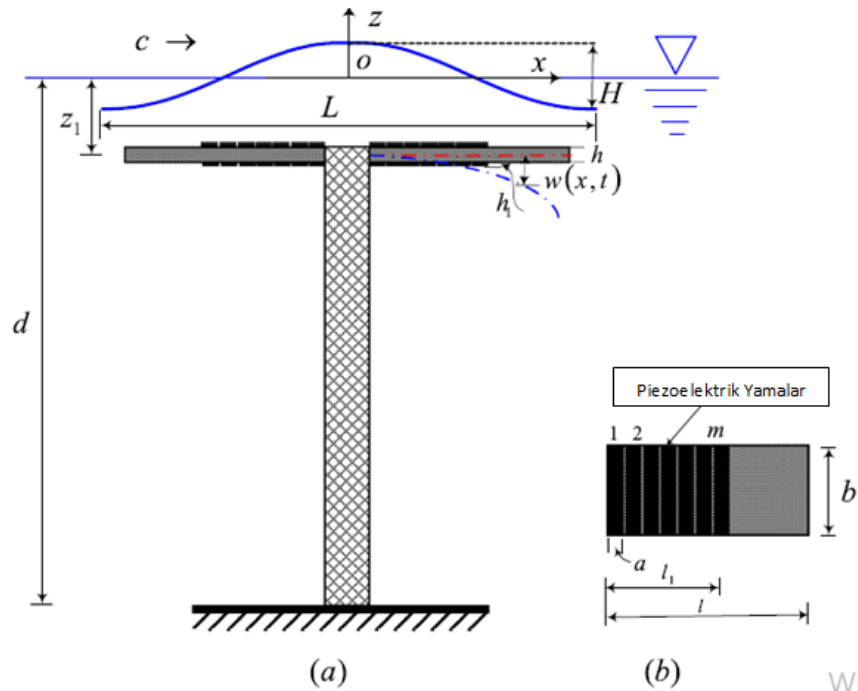
RMS (Root Mean Square) Türkçe olarak karelerinin ortalamasının karekökü ifadesidir. Değişken bir akım veya gerilimin büyüklüğünü ifade etmenin bir yolu genliğini belirtmektir. Fakat, genlik bize akım veya gerilimin tepe değerini verir. Bazen, ortalama değeri bilmek daha faydalıdır. Basit anlamda tüm değerlerin ortalamasını almak fayda sağlamaz. Bu sonuçtan kaçınmak için, tüm sayıların karesinin pozitif olduğu gerçeği kullanılarak bir işlem yapılır.



Bu tür bir ortalama değeri bulmak için özel bir matematiksel yöntemle, önce bir periyot boyunca kaydedilen binlerce gerilim değerinin karesi alınır. Daha sonra karelerinin ortalaması bulunur. Son olarak da ortalamanın karekökü alınır. Elde edilen ortalama değerine karelerinin ortalamasının karekökü veya kısaca RMS denir (Anonim, 2018a).

RMS'nin konsolların uzunluğu ve dalga yüksekliğinin artmasıyla arttığını ve okyanus yüzeyinin konsolların mesafesine ve dalga boyunun okyanus derinliğine oranının azaldığını göstermektedir. Sonuç olarak, okyanus yüzeyinin altındaki farklı enerji hasadı noktalarında maksimum RMS elde etmek için optimum okyanus derinliği elde edilmiştir.

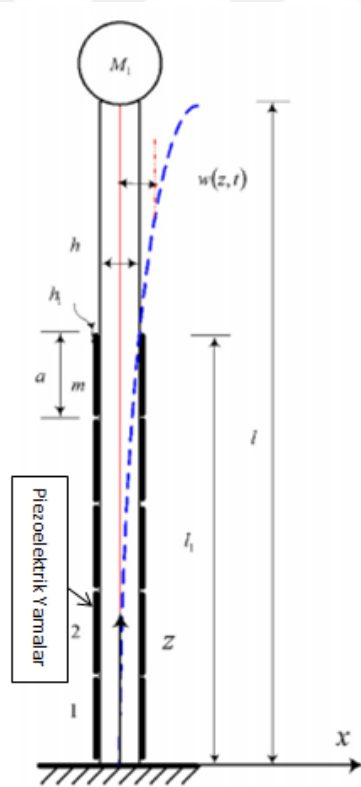
Okyanus yüzeyinin altındaki okyanus derinliği, dalga boyu, dalga yüksekliği ve hasat yerinin değeri 10,6 m, 21,2 m, 4 m ve 2 m olan pratik bir enine dalga için 30W'a kadar olan güç değeri gerçekleştirilebilir. Bu araştırma, bir deniz platformunda kolayca sabitlenebilen piezoelektrik enerji toplayıcıları tarafından enine dalgalardan verimli ve pratik enerji toplanmasına yol açan yeni bir teknik geliştirmiştir. Bu araştırma Kanada Araştırma Başkanları Programı (CRC) ve Kanada Doğa Bilimleri ve Mühendislik Araştırma Konseyi (NSERC) tarafından desteklenmiştir.



Şekil 2.8. Enerji hasat makinesinin kurulması (Xie ve diğerleri, 2014).

Xie vd. (2014), piezoelektrik konsol tasarımı yapmışlardır. Piezoelektrik konsol iki su dalgası hasat uygulamasında kullanılmıştır. İlk uygulama, konsol kirişinin deformasyonuna neden olan dalga tarafından indüklenen su parçacıklarının uzunlamasına hareketlerinden yararlanılmışlardır. Konsol alt tabakası, esnek olan polivinilidenflorürün (PVDF) piezoelektrik özelliklerine sahip piezoelektrik yamalar ile deniz tabanına tutturulmuş ve uzunlamasına dalga hareketini yakalamak için konsolun diğer tarafına bir geçirmez kütle sabitlenmiştir.

Piezoelektrik dalga dönüştürücüsünün şeması Şekil 2.9'da gösterilmektedir. Kütle, yer değiştirmenin ardından dalgaların periyodik ve salınımlı hareketini takip eder, bu da piezoelektrik yamaların deformasyonuna ve sapmasına neden olmaktadır. Piezoelektriklerin deformasyonu ile elektromekanik kuplaj etkisi sayesinde elektrik enerjisi toplanmaktadır.



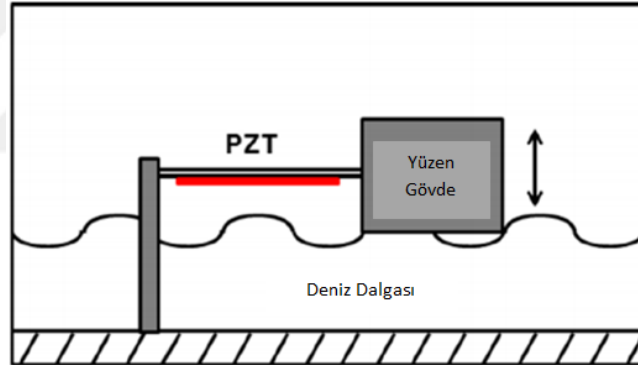
Şekil 2.9. Önerilen enerji dönüştürücüsünün şeması (Xie vd., 2014).

Çıktı gücünü farklı geometrilerde tahmin etmek için matematiksel bir model geliştirilmiştir (Xie, Wang ve Wu, 2014). Bu tasarımın ortalama güç çıktısının dalga yüksekliğinde ve deniz derinliğinde artış eğilimi olduğu belirtilmiştir. Cihaz başına maksimum elektrik gücü, 3 m dalga yüksekliği ve 6 m deniz derinliği için 145 W olarak hesaplanmıştır.

Woo vd. (2015) Su dalgaları sadece uzunlamasına hareketi değil, aynı zamanda dikey yukarı ve aşağı hareketleri de indüklediğinden, değiştirilmiş bir piezoelektrik dalga dönüştürücü önermişlerdir. Bu tür bir piezoelektrik dalga toplama sisteminin şeması, Şekil 2.10'da gösterilmektedir.

Dikey piezoelektrik dirsekli konveksiyonlu bir titreşim sistemi kullanmak yerine, bu dalga biçerdöveri, su yüzeyine paralel yerleştirilmiş bir piezoelektrik konsolun (PZT) serbest ucuna tutturulmuş yüzen bir gövdenin hareketini kullanmıştır.

Kayan gövde, konsolun serbest ucunda sapmayı yaratan dalganın hareketine bağlı olarak ağır bir harekete maruz kalmıştır. Bu şekilde, dalganın hareketi piezoelektrik konsolun zorlanmasına neden olan mekanik enerjiye dönüştürülmüştür. Piezoelektrik etkisine rağmen, şekil değiştirme deformasyonu başarıyla elektrik enerjisine aktarılmıştır.



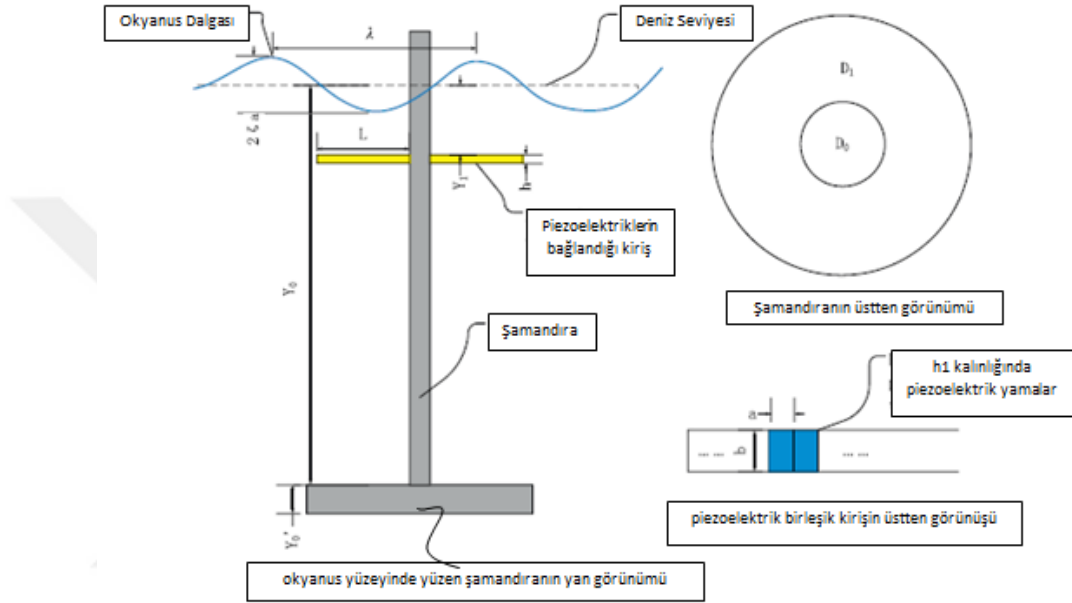
Şekil 2.10. Piezoelektrik enerji toplayıcısının şematik diyagramı (Woo vd., 2015).

Wu vd. (2015), okyanus dalgalarından elde edilen uygun bir piezoelektrik bağlantılı şamandıra enerji toplayıcısı geliştirmiştir. Şamandıra yapısının akıllı tasarımı, şamandıra ve platin boyutlarının etkilerinin araştırılması ile enerji hasat verimliliğini artırmak için geliştirilmiştir. Makine, enerji hasadı için orta ve derin okyanusta kolaylıkla askıya alınabilen yüzen bir şamandıra yapısına bağlı birkaç piezoelektrik bağlantılı konsoldan yapılmıştır (Şekil 2.11).

Enerji toplama işlemi, enine okyanus dalgası enerjisinin, şamandıra üzerine sabitlenmiş konsollara monte edilmiş piezoelektrik yamalar vasıtasıyla elektrik enerjisine dönüştürülmesiyle gerçekleştirilmiştir.

Şamandıra yapısının akıllı bir tasarımı, şamandıra ve platin boyutlarının etkilerinin araştırılmasıyla enerji hasat verimliliğini arttırmak için geliştirilmiştir.

Araştırma bulguları, teklif edilen uygun şamandıra makinesi ile 1 metrelik piezoelektrik konsolların uzunluğu ve 20 metrelik şamandıra uzunluğu ile 24 W'a kadar elektrik gücünün üretilebileceğini göstermektedir.



Şekil 2.11. Şamandıralı sistem görseli (Wu vd., 2015).

Mutsuda vd. (2017), FPED olarak hazırladıkları yapılardan elektrik hasadı elde etmeyi amaçlamışlardır.

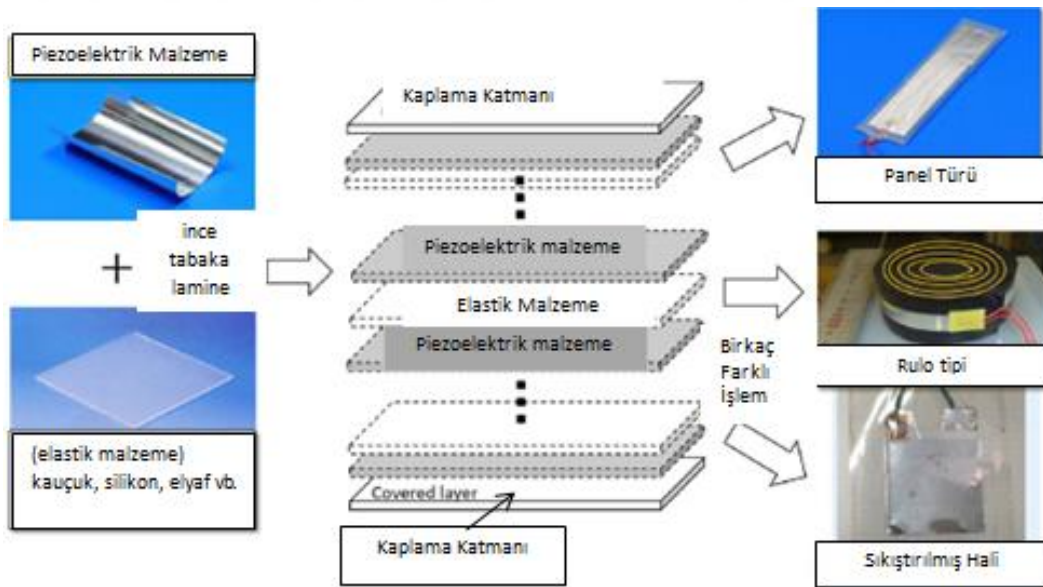
FPED, polivinilidenflorür (PVDF) ve silikon, kauçuk veya elastik materyal gibi ve piezoelektrik malzemenin lamine ince katmanlarından oluşur. FPED'ler son derece esnektir ve çeşitli dış kuvvetlerden enerji toplamak için uyarlanabilir, zorlama büyüklüğüne ve elektrik talebine göre uyarlanacak şekilde özelleştirilebilir ve optimize edilebilir yapılardır (Şekil 2.12).

Bu çalışmada, dalgaların ve akımların neden olduğu aşırı eğilme ve hava koşullarına dayanmak için son derece dayanıklı, boyalı bir piezoelektrik tabaka ile FPED, bir okyanus enerji hasat cihazı olarak kullanılmak üzere spreyle kaplama önerilmiş ve geliştirilmiştir.

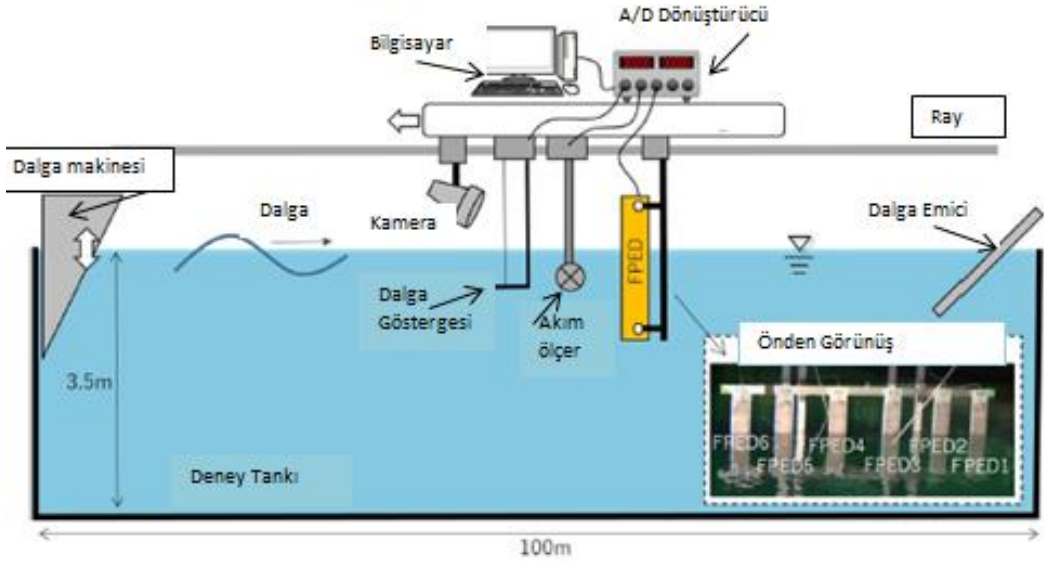
Elektron sıvı yapı etkileşimlerini tahmin etmek ve boyalı FPED'in elektriksel performansını ve mekanik davranışlarını değerlendirmek için sayısal bir yöntem geliştirilmiştir. 5 farklı kalınlıkta ve iki farklı malzeme kullanılarak numuneler hazırlanmıştır. Kullanılan malzeme ve kalınlığa göre parametrelerde değişim gözlemlenmiştir. Ek olarak, sayısal modelin doğrulanması birkaç deneysel test ile sağlanmıştır. Test düzeneği Şekil 2.13'te gösterilmiştir.

Bu çalışmada aynı zamanda boyalı FPED'in sertliği ile titreşimli frekans arasındaki ilişkiyi ve elektrik performansı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Ayrıca çıkış voltajı dalga dikliği ve akım hızı ile doğrusal olarak arttığı gözlemlenmiştir.

Alan testinde, çıkış voltajı dalga hareketi ile tetiklenen FPED titreşimi ile FPED hareketinin ivmesi arasında güçlü bir ilişki vardır. Boyalı FPED, gerçek okyanus alanında dalga ve akımın neden olduğu bükülme ve hava koşullarında yüksek dayanıklılık göstermiştir. Buna ek olarak, FPED yorulma testi yapılmalı ve gerçek okyanus alanında elektrik performansı ve verimliliğini artırmak için piezoelektrik boya geliştirilmelidir sonucuna ulaşmışlardır.



Şekil 2.12. FPED yapısı (Mutsuda vd., 2017).



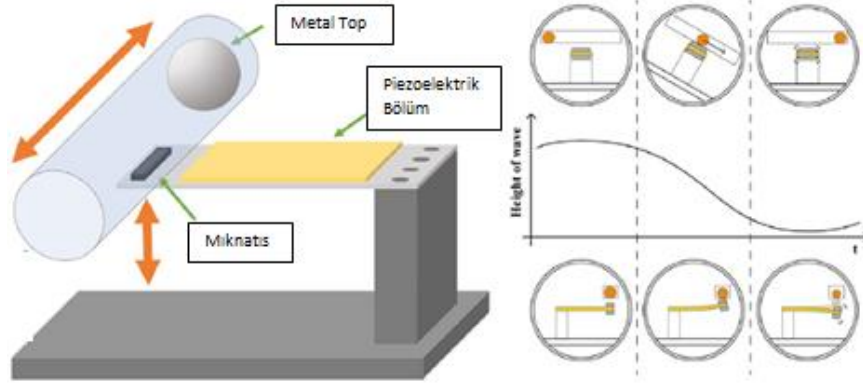
Şekil 2.13. FPED test düzeneği görseli (Mutsuda vd., 2017).

Hwang vd. (2017), okyanustan enerji toplamak için kullanılabilir bir piezoelektrik enerji toplama sisteminin tasarımı üzerinde çalışmıştır. Okyanus dalgalarının neden olduğu düşük frekanslı titreşimlerden enerji toplayabilen bir piezoelektrik enerji hasat sistemi geliştirilmiştir.

Kullanılan konsol sistemi, dar rezonans frekansı, tek yönlü çalışma ve düşük frekanslarda düşük güç üretimi sorunlarından muzdarip olduğundan, önerilen projede, bir mıknatıs üzerine yerleştirilmiş bir ray boyunca hareket eden bir metal top kullanılarak tasarlanmıştır. Şekil 2.14'te gösterildiği gibi, sistem temel bir konsoldan oluşmaktadır. Her piezoelektrik modülün mıknatısı rayın altına yerleştirilmiştir.

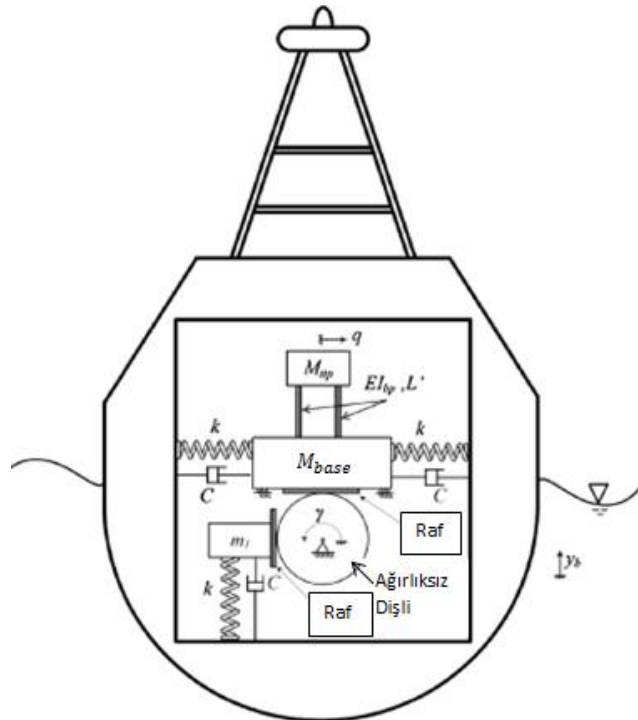
Çerçevenin düzgün eğilmesini sağlamak için iki rulmanlı bir mil yerleştirilen dairesel çerçevenin ortasından bir delik açılmıştır. Daha sonra, okyanus dalgaları ile cihaz yer değiştirmesini simüle etmek ve cihazın gerekli eğimi sağlamak için bir çalkalayıcı ve bir yer değiştirme sensörü kullanılmışlardır.

Maksimum açık devre voltajı 13.2 mm'lik bir yer değiştirme için 21.1 V elde etmişlerdir. Sonrasında, maksimum güç depolama için gerekli olan kapasitörün değerini belirlemek için deneyler yapıp depolanan enerji miktarının kapasitansa bağlı olduğunu öngörmüşlerdir.



Şekil 2.14. Piezoelektrik enerji hasat cihazı ve çalışma biçimi (Hwang vd., 2017).

Nabavi vd. (2018), çalışmasında, en iyi şekilde bir Ocean Wave Energy Harvester (OWEH) olarak kullanılabilecek yeni bir ışın kolunu piezoelektrik bazlı enerji toplama sistemi tasarlamışlardır (Şekil 2.15). Bunu yaparken, enerji toplama sistemi için elektromekanik hareket denklemleri doğru bir şekilde türetilmiştir. Geçerli denklemler kullanılarak elde edilen sonuçlar, deneysel sonuçlar ile doğrulanmıştır. Büyük dalga boyuna ve düşük frekansa maruz kalan şamandıradaki enerji toplama sisteminin daha verimli olduğu gösterilmiştir. Son olarak, okyanus dalgası frekansına dayalı olarak çalışan kendiliğinden ayarlanan şamandıranın uygulaması incelenmiştir. Sunulan yeni sistem, okyanus dalgası enerjisini uygun şekilde kullanmaya yardımcı olan yeni bir araştırma alanı açmıştır.



Şekil 2.15. Piezoelektrik tabanlı şamandıranın şematik görüntüsü (Nabavi vd., 2018).

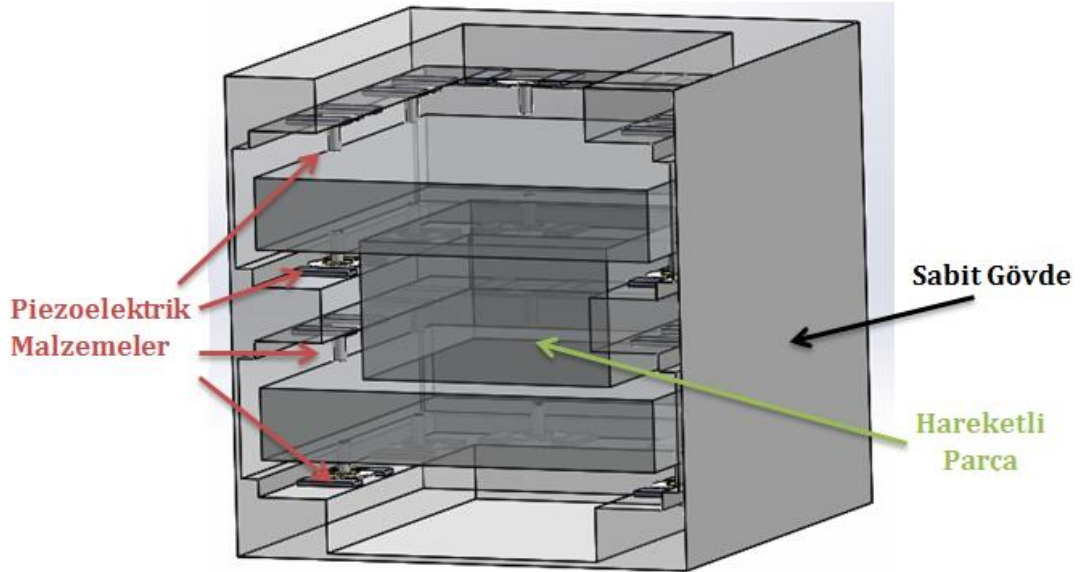
### 3. İMALATI YAPILAN PİEZOELEKTRİK ENERJİ HASAT SİSTEMİ

Bu tez çalışmasında, derinliği 1 - 3 metre olan sığ sularda kullanılması amacıyla tasarlanan ve imalatı yapılan tasarımı ve imlatı yapılan hasat sisteminde, deniz dalgası enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmek için piezoelektrik malzemeler kullanılmıştır.

Sistem, deniz dalgasının yükselme ve alçalma hareketleri ile su yüzeyinde bulunan bir şamandırayı yukarı aşağı hareket ettirmesi ile sistem içinde piezoelektrik bulunan yüzeylere basınç kuvveti iletmektedir.

Sistemin teknik çiziminde (Şekil 3.1) görüleceği gibi piezoelektrik malzemeler iki yönlü raflara dizilmiş şekilde yerleştirilmiştir. Her bir piezoelektrik parça üzerine yerleştirilen butonlar ile hareketli parçanın her hareketinde piezoelektrikler üzerine basınç uygulanacaktır. Uygulanan basınç piezoelektrik malzemelerden doğru akım cinsinden elektrik elde edecektir.

Şamandıranın salınım hareketi sonucu dalga yüksekliğinin zamanla değişmesi ile üretilen elektrik enerjisinin, gerilim, akım ve gücünün değişimi incelenecektir.



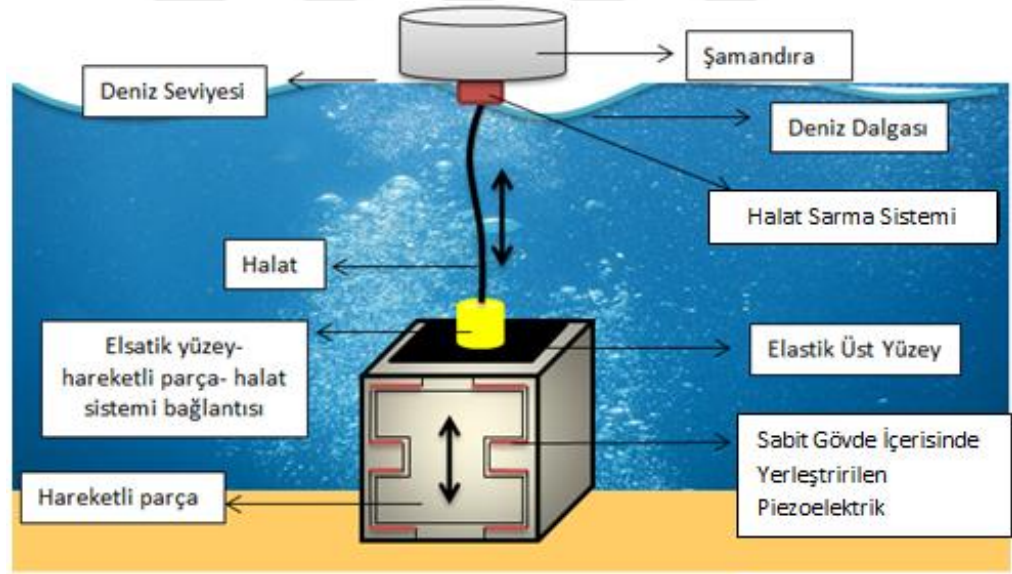
Şekil 3.1. Piezoelektrik malzemeli enerji hasat sisteminin gövdesinin teknik resmi



Sistemin çalışma prensibi Şekil 3.2’de verilmiştir. Şekil üzerinde görülen halat sarma sistemi deniz seviyesinin yükselmesi durumunda deniz yüzeyinde bulunan şamandıranın batmasını engelleyip, gereken yükseklikte uzayarak şamandıranın yüzer konumunu koruması için ayarlanmıştır.

Mevcut sistem deniz profil cihazlarından olan nokta emici sistem göz önüne alınarak tasarlanmıştır. Sistem üzerinde görülen elastik malzeme ile kaplanmış olan alan, bir diyafram gibi çalışmaktadır.

Dalganın gelmesiyle yükselen su seviyesi şamandırayı yukarı doğru itecektir bu sırada hareketli parça, halat sarma sistemi ile yukarı doğru çekilecektir. Bu işlemlerin gerçekleşmesi ve şamandıradan gelen çekme kuvvetinin hareketli parçaya etki etmesi için elastik bir malzeme kullanılmıştır. Dalga hareketi geçip su normal seviyeye geldiğinde elastik bölüm nötr konumuna geri dönecektir.



Şekil 3.2. İmal edilen sistemin yapısı ve çalışma prensibi

Sistemi oluşturan üç temel yapı bulunmaktadır. Bu yapılarla ilgili şematik çizim Şekil 3.2’de verilmiştir. Bunlar; Piezoelektrik malzemelerin yerleştirildiği “Sabit gövde”, dalga hareketine bağlı olarak sabit gövdedeki piezoları tahrik eden “Hareketli parça” ve su yüzeyinde dalganın kinetik enerjisini alarak hareketli parçaya ileten “Şamandıra” sistemidir.(Şekil 3.3)

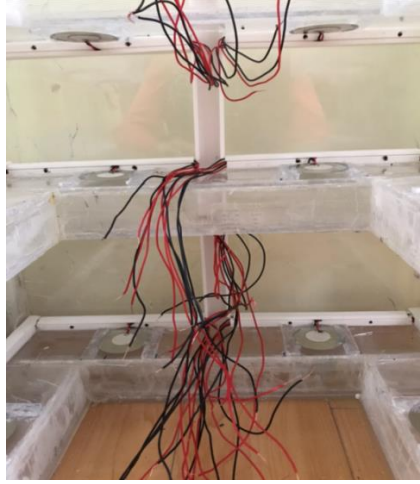


Şekil 3.3. Piezoelektrik enerji hasat sistemi

Ön tasarım çalışmalarından sonra uygun malzeme seçimine geçilmiş, hem sabit gövde hemde hareketli parça için, yapı malzemesi olarak suya karşı dayanıklılığı ve uzun ömürlü olması göz önüne alınarak plexiglass malzeme seçilmiştir. Bu malzemedен imal edilen gövde, iki katlı ve yaklaşık olarak 40x40x40 cm ebatlarında küp biçimindedir.

İki katlı olarak inşa edilen sabit gövdenin içerisine, 6 adet alt yüzeyde, 6 adet üst yüzeyde olmak üzere toplamda 24 adet piezoelektrik malzeme yerleştirilmiştir (Şekil 3.4).

Sabit gövde içerisinde yerleştirilen davul tipi piezoları ait kabloların geçebileceği bir kanal hazırlanmıştır. 1.2x1.2 cm boyutlarındaki kablo kanalları alt ve üst katmanların makinenin iç boşluğuna bakan yüzeylerine açılmıştır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. Davul tipi piezoelektrik malzemelerin yerleşimi ve kablolanması

Hareketli parçanın şamandıra ile bağlantısını sağlamak için çapı 110 mm olan boru şeklinde bir silindirik parça takılmıştır. Silindirik parçanın üzerine diyafram biçiminde esneklik sağlayan elastik bir parça takılmıştır. Bu elastik parça, şamandıranın yukarı-aşağı hareketinin sabit gövde içerisindeki hareketli parçaya sızdırmaz bir şekilde iletilmesinin sağlamaktadır.

Derinliği 1 - 3 metre arasında bulunan derinliklerde ve gelgitlere bağlı olarak su seviyesindeki değişimlere uyum sağlayabilen bir halat sarma sistemi tasarlanmış ve şamandıraya bağlı olarak çalışması sağlanmıştır. Halat sarma sistemi, dalga hareketine bağlı olarak halatı çözmek veya sarmak suretiyle, şamandıranın her zaman su yüzeyinde kalmasını aynı zamanda da su tabanındaki sisteme gerekli dalga hareketini iletebilmesi için gerekli halat gerginliğini sağlamaktadır (Şekil 3.5).

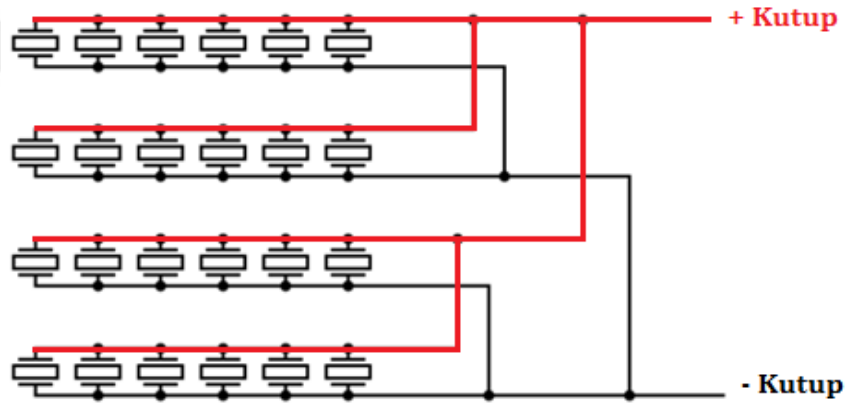


Şekil 3.5. Halat sarma sistemi

### 3.1. Elektriksel Bağlantılar ve Kontrol Sistemi

Piezoelektrik malzemelerin devre bağlantısı için literatürde yer alan çalışmalar da dikkate alınarak hem seri hemde paralel bağlantı seçeneği denenmiştir. Piezoelektrik malzemeler sürekli olarak elektrik üreten bir malzeme olmadıklarından sadece üzerine basınç uygulandığı zaman anlık gerilim ve amper üretebilmektedir. Bu sebeple her basınç uygulandığında hasat sisteminin tüm piezoelektrik üyeleri aynı anda elektrik üretemeyeceğinden elektrik bağlantısının paralel yapılması anlık gerilimin ve akımın yüksek olmasını sağlamıştır.

Denemelerden elde ettiğimiz sonuçlara göre tasarladığımız sistem için paralel bağlantı şemasının güç üretimi açısından daha verimli olduğu tespit edilmiştir. Buna göre paralel bağlantı şemasına uygun olarak 24 adet piezoelektrik malzeme pozitif ve negatif kutuplarına denk gelecek şekilde iletim kabloları Şekil 3.6'daki gibi lehimlenmiştir.



Şekil 3.6. Piezoelektrik malzemelerin paralel bağlantı devre şeması

Şamandıranın yukarı yöndeki hareketinde üst katmanlardaki piezoelektrik malzemeler, aşağı yönlü hareketinde ise alt katmanlardaki piezoelektrik malzemelere basınç kuvveti etki etmektedir.

Dalga enerjisinden elde edilecek olan anlık gerilim, akım ve güç değerlerini görmek ve dalga durumuna göre test etmek için arduino sistem kullanılmıştır. Arduino sistem için Arduino UNO kart kullanılmıştır.

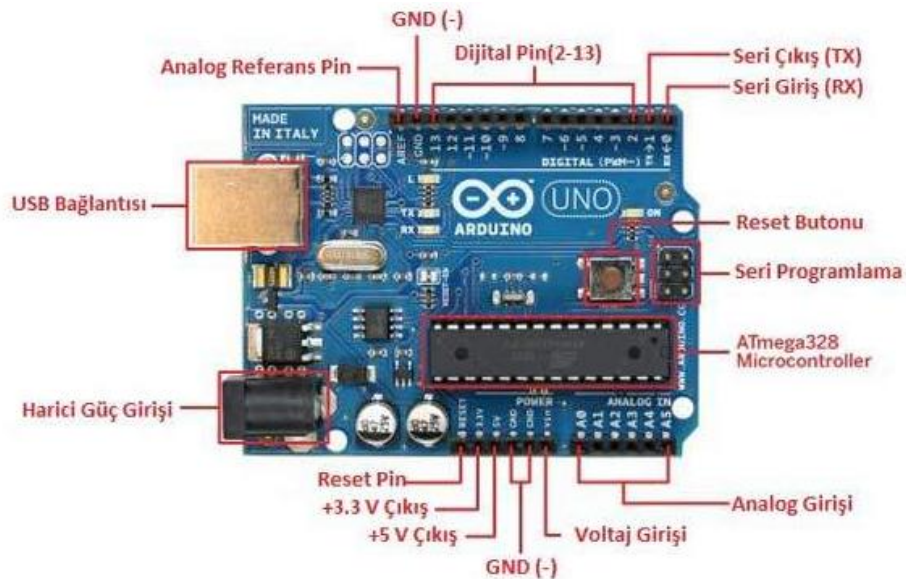
### 3.1.1. Arduino Uno özellikleri

Arduino, elektronik donanım ve yazılım temelli bir geliştirme platformudur. Arduino ile öğrenciler de profesyoneller de çok detaylı programlama ve elektronik bilgiye sahip olmadan, temel bilgiler ile hobi amaçlı, eğitim amaçlı veya profesyonel anlamda projeler yapabilmektedir.

Arduino Uno, en yaygın kullanılan ve en çok bilinen modelidir. 2010 yılında kullanıma sunulmuştur. Avantajları olarak aşağıdaki özellikler sayılabilir.

- Açık kaynaklı kodludur.
- Dış dünyaya çıktılar (ses, ışık, hareket vs.) üretilebilir.
- Sensörlerden gelen verileri kullanılabilir.
- Analog ve dijital girişleri sayesinde analog ve dijital veriler işlenebilir.

Arduino Uno ile LED yakıp söndürmek gibi en temel uygulamalardan drone, robot, akıllı ev otomasyonu, hırsız alarm sistemi, park sensörü gibi daha gelişmiş projeler de yapılabilir. Kısacası Arduino Uno, standart boyutlarda bir kontrol kartı olup, basitten zora birçok uygulamada elektronik devrelerin kontrol edilmesini sağlamaktadır. Şekil 3.7’de Arduino Uno üzerinde bulunan bölümler verilmiştir (Şeremet, 2019).



Şekil 3.7. Arduino kart üzerinde bulunan elemanların tanıtımı (Şeremet, 2019)

Vin: Harici güç kaynağı için kullanılan pin.

5V: Regülatörden çıkan 5V çıkış gerilimini sağlar.

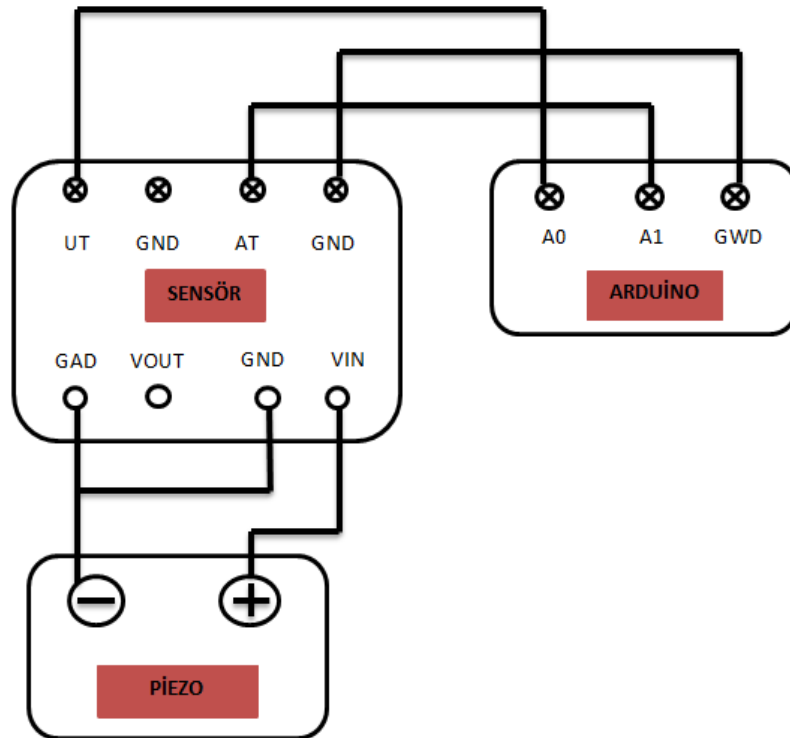
3V3: Kart üzerinde bulunan 3.3V regülatörü çıkış pinidir. Maks. 50mA çıkış verebilir.

GND: Toprak (-) pinleridir.

Analog- A0, A1, A2, A3, A4, A5: 6 adet 10-bit çözünürlüğünde analog giriş pini bulunmaktadır. Bu pinler dijital giriş ve çıkış için de kullanılabilir. Pinlerin ölçüm aralığı 0-5V'tur (Semiz , 2018).

Şekil 3.8'de verilen bağlantı şeması piezoelektrik hasat sisteminden alınan pozitif ve negatif çıkışların akım gerilim sensörüne bağlantısı ve sensörden alınan çıkışların arduino karta girişi gösterilmiştir.

Sistemde kullanılan sensör Max471 Gerilim ve Akım Sensör Modülü ürünü akımı ve gerilimi test etmek için kullanılır. Arduino Uno karta yapılan yazılım ile sistemden elde edilen gerilim, akım ve bu iki değere bağlı olarak güç değerleri ölçümü yapılmıştır.



Şekil 3.8. Arduino bağlantı şeması

Hasat sisteminden elde edilen elektriksel güç değerlerinin hesaplanması için yazılımda aşağıdaki eşitlik kullanılmıştır.

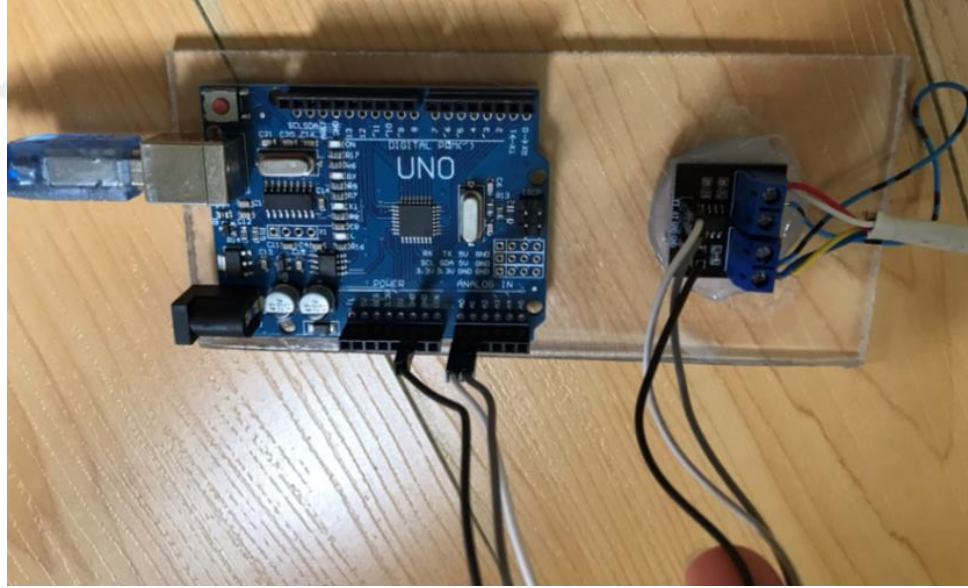
$$P_p = V \cdot A$$

$P_p$  : Piezoelektrik hasat sisteminin elektriksel güç değeri (W),

$V$  : Gerilim (V),

$A$  : Akım (A),

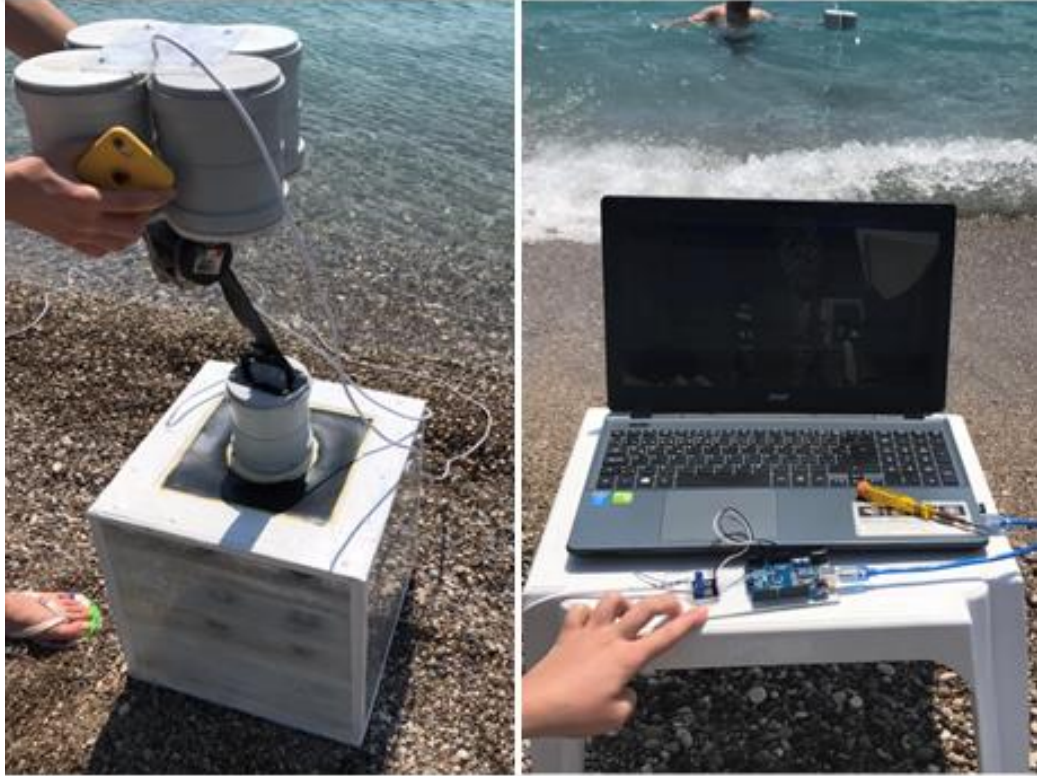
Piezoelektrik sistemin negatif çıkışı sensörün GND ve GAD girişlerine, pozitif çıkışı ise sensördeki VIN girişine bağlanmıştır. Sensördeki GND çıkışı ise arduinodaki GND girişine, AT çıkışı A1 girişine, UT çıkışı ise A0 girişine bağlanmıştır. Arduino kart bağlantısı Şekil 3.9'da verilmiştir. Arduino kart üzerindeki sistem bir bilgisayar USB girişi için tasarlanmıştır. Bilgisayara takılan USB girişi ile program çalıştırıldığında belirlenen sıklıkta ölçüm yapılmaktadır ve anlık değerler seri port ekranı üzerinden takip edilmektedir.



Şekil 3.9. Arduino kart bağlantısı

#### 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

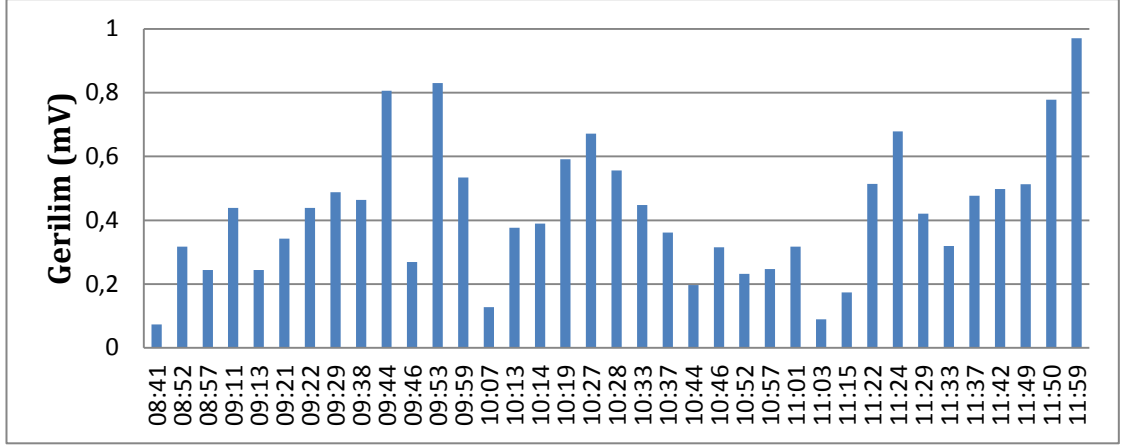
Enerji hasat sistemi 2019 Haziran ve Temmuz ayı içerisinde toplamda üç kere test edilmiştir. Testler Antalya/Konyaaltı sahilinde, verilen enlem- boylam bilgilerine ait koordinatlarda (36.884380 enlem ve 30.677074 boylam) yapılmıştır. Enerji hasat sistemi doğal deniz ortamında test edilmiştir (Şekil 4.1). Sabah saat 08:30 dan Toplamda 10 saatlik test süresi olmuştur ve üç ayrı zaman diliminde yapılmıştır. Test süresini üç farklı zaman diliminde yapılmasının amacı doğal deniz ortamındaki dalga yüksekliğinin ve sıklığının gün içerisinde değişmesidir. Buradaki amaç sistemin doğal ortamdaki davranışını gözlemleyebilmek ve mevcut şartlarda enerji eldesini sağlayıp sağlayamayacağını test etmektir.



Şekil 4.1. Piezoelektrik hasat sisteminin deniz ortamında test edilmesi

Sabah saatlerinde (08:30 - 12:00) yapılan ölçümlerde dalga yüksekliğinin elektrik üretmek için yeterli olmadığı görülmüştür. Elde edilen gerilim değerlerinin ortalaması 0.409 mV'dir. Şekil 4.2'de verilen grafikte piezoelektrik hasat sisteminin ürettiği gerilimin zamana bağlı değişimi görülmektedir.





Şekil 4.2. Piezoelektrik hasat sisteminin 08:00 - 12:00 saat diliminde ölçülen gerilim değerleri

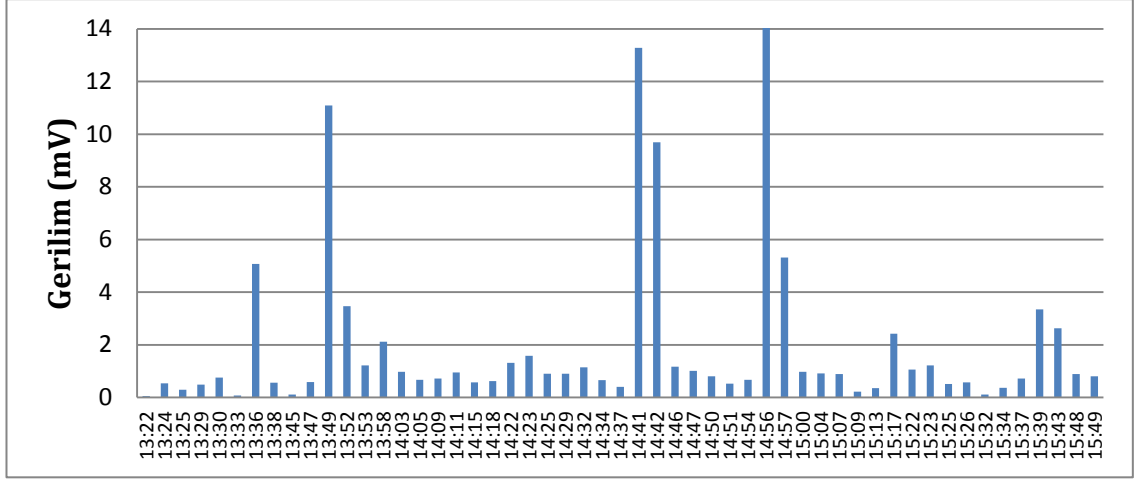
Dalga enerjisinin gücü 7.5 cm dalga yüksekliğinde  $P= 13.78$  W/m olarak hesaplanmıştır. Fakat bu saat diliminde ölçülen gerilim değerinin çok küçük olması ve amper değerinin ise hiç ölçülememesi nedeniyle hasat sisteminden elde edilen güç  $P_{p-ort}$  elde edilememiştir.

Öğle saatlerinde (12:00 - 15:30) yapılan ölçümlerde dalga boyunun ortalama 20 cm'ye yükseldiği ve buna bağlı olarak ortalama gerilim değerinde 1.932 mV'a yükseldiği görülmüştür.

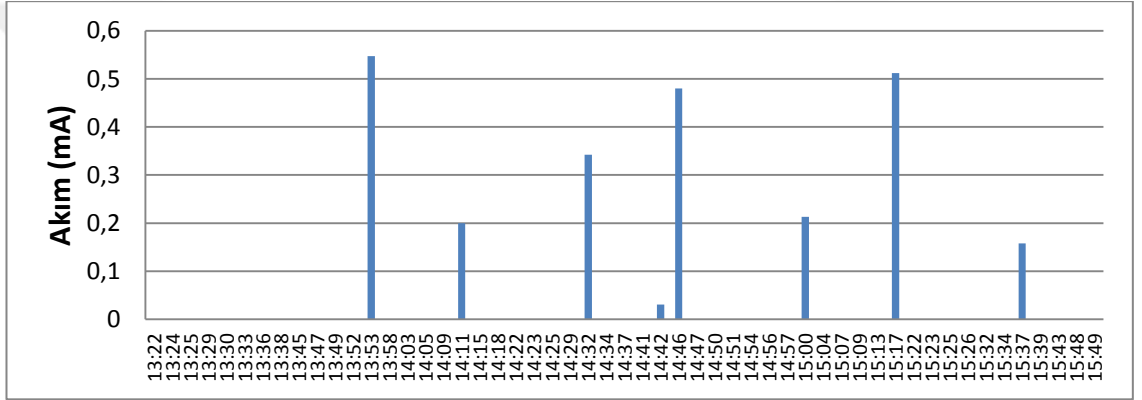
Şekil 4.3'de verilen grafik 12:00 - 15:00 saat diliminde hasat sisteminin ürettiği gerilim değerlerinin zamana bağlı değişimi gösterilmiştir. Grafikten de anlaşılacağı üzere piezoelektrik hasat sistemi sabah saatlerine göre artan dalga yüksekliği ve şiddeti ile daha yüksek değerlerde gerilim üretmiştir.

12:00 - 15:30 saat diliminde ortalama akım değeri 0.310 mA olarak ölçülmüştür. Şekil 4.4'de verilen grafik piezoelektrik hasat sisteminin ürettiği olduğu akım verilerini göstermektedir.

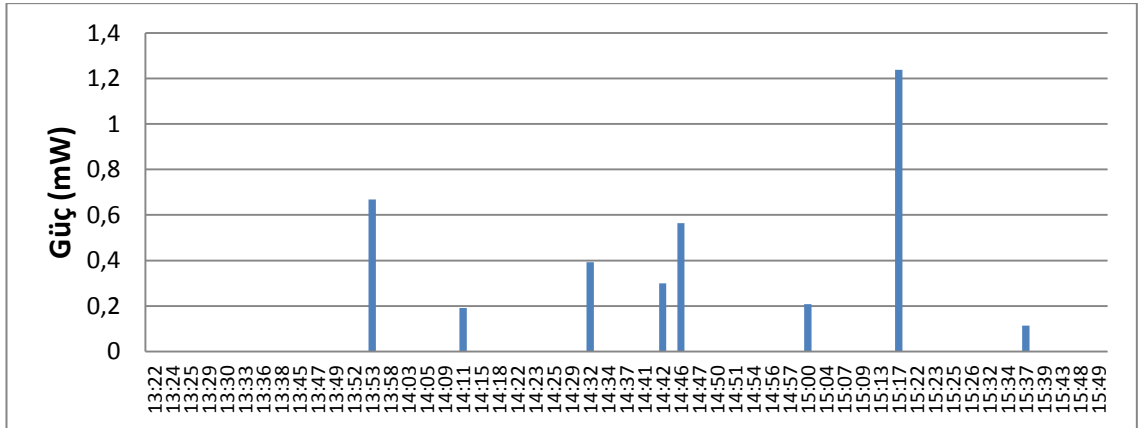
Dalga enerjisinin gücü 20 cm dalga yüksekliğinde  $P= 98.03$  W/m olarak hesaplanmıştır. 12:00 - 15:30 saat diliminde elde edilen güç (watt) değerleri Şekil 4.5'te verilmiştir. Bu saat diliminde hasat sisteminden elde edilen ortalama güç  $P_{p-ort}= 0.459$  mW olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.3. Piezoelektrik hasat sisteminin 12:00 - 15:30 saat diliminde ölçülen gerilim değerleri

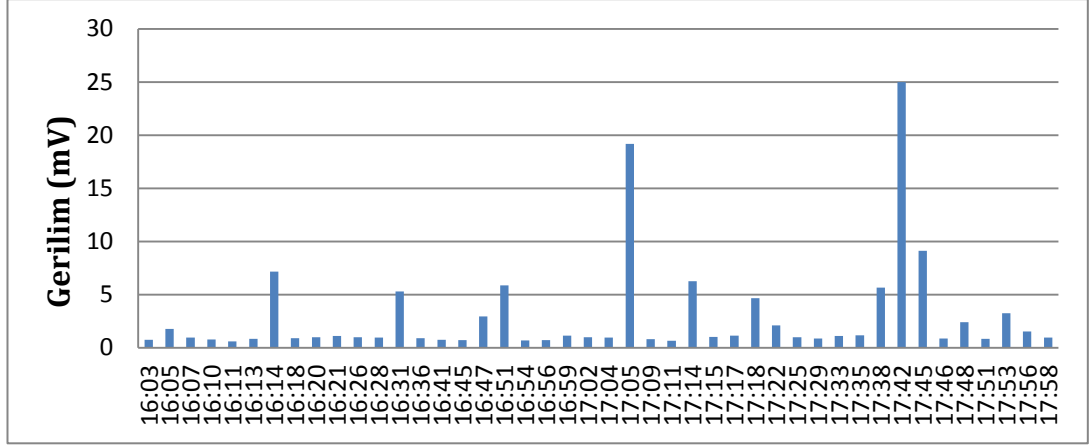


Şekil 4.4. Piezoelektrik hasat sisteminin 12:00 - 15:30 saat diliminde ölçülen akım değerleri



Şekil 4.5. Piezoelektrik hasat sisteminin 12:00 - 15:30 saat diliminde ölçülen güç değerleri

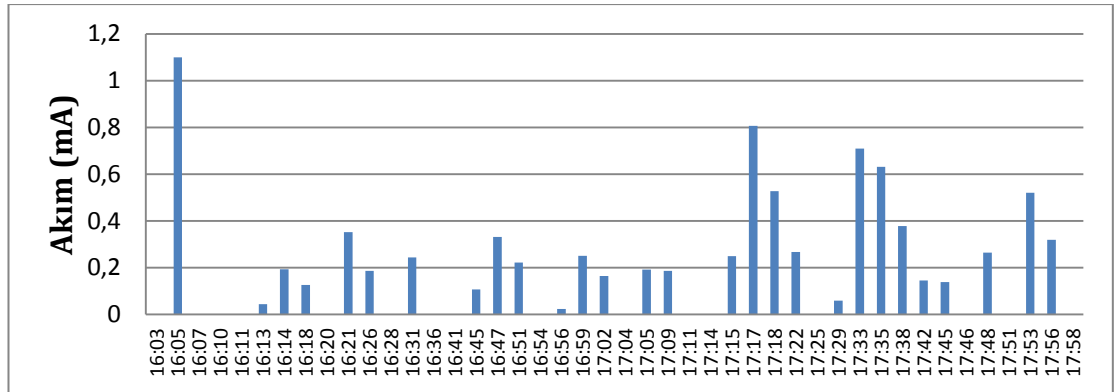
Saat 16:00'dan itibaren yapılan gerilim ölçüm değerlerinin ortalaması alındığında 2.925 mV olduğu görülmüştür. Ölçülen gerilim değerleri Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.6. Piezoelektrik hasat sistemden saat 16:00'dan sonra elde edilen gerilim değerleri

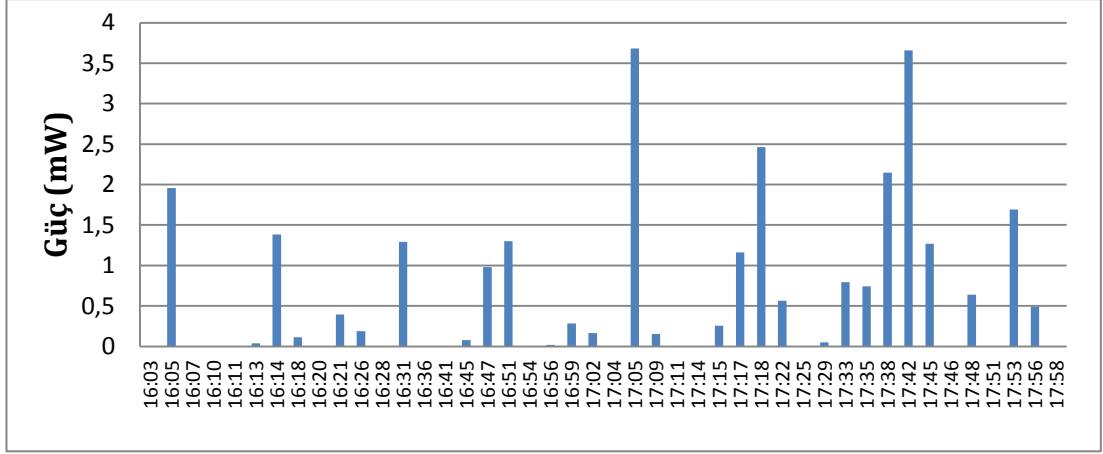
Yapılan ölçümlerin geneline bakılacak olursa en yüksek dalga yüksekleri saat 16:00'dan sonra görülmüştür. Yükselen dalga boyuna bağlı olarak piezoelektrik hasat sisteminin gerilim değerleri diğer saat dilimlerine kıyasla daha yüksektir.

Ölçümlerde ortalama akım değeri 0.312 mA olarak görülmüştür. Şekil 4.7'de elde edilen akım değerleri verilmiştir. Piezoelektrik hasat sisteminin elde edilen akım değerleri dalga yüksekliğinin artmasına bağlı olarak diğer saat dilimlerine göre daha yüksek olmuştur.



Şekil 4.7. Piezoelektrik hasat sistemden saat 16:00'dan sonra elde edilen akım değerleri

Dalga enerjisinin gücü 35 cm dalga yüksekliğinde  $P = 300.243 \text{ W/m}$  olarak hesaplanmıştır. Saat 16:00'dan sonra hasat sisteminden elde edilen ortalama güç  $P_{p-ort} = 0.998 \text{ mW}$  olarak ölçülmüştür. Şekil 4.8'de piezoelektrik hasat sisteminin ürettiği güç değerleri verilmiştir.

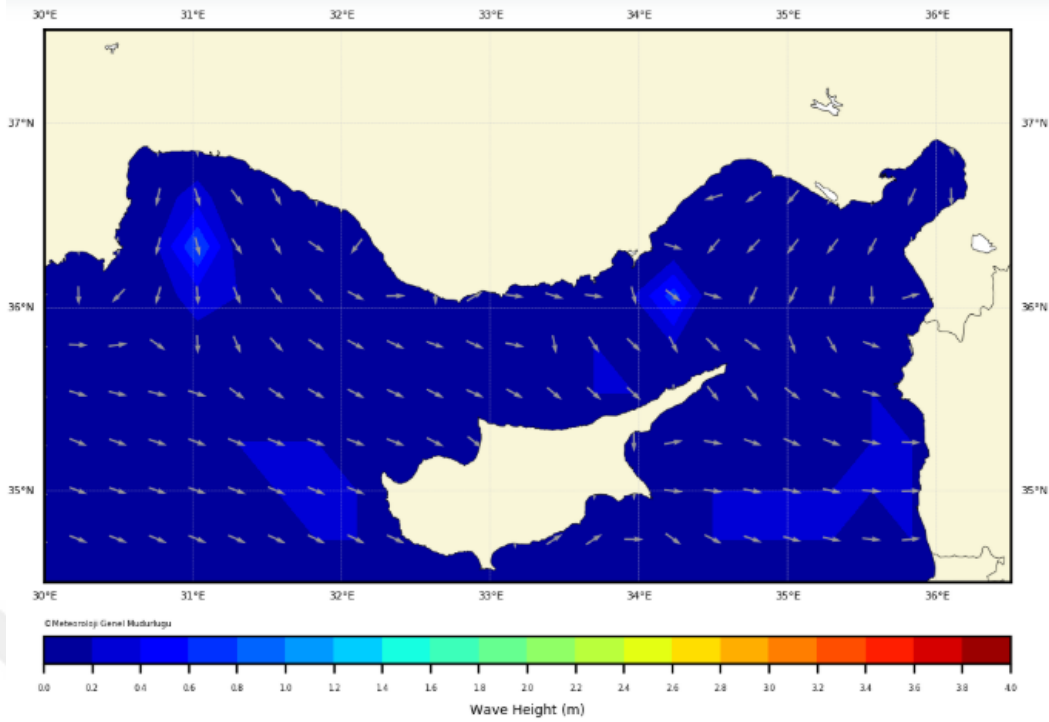


Şekil 4.8. Piezoelektrik hasat sistemden saat 16:00'dan sonra elde edilen güç değerleri

Piezoelektrik hasat sisteminin yapılan testlerden anlaşılacağı gibi en yüksek gerilim, akım ve güç değerlerini dalga yüksekliğinin artmasına bağlı olarak saat 16:00'dan sonraki ölçümlerde elde edilmiştir.

Genel olarak bakıldığında güç değeri okunabilen saat 12:00'dan 19:30'a kadar olan zaman dilimi içerisinde piezoelektrik sistem ortalama 0.730 mW değerinde güç elde ettiği, ortalama güç yoğunluğu değeri ise 0.370 mW olduğu görülmüştür. Bu verilere göre enerji hasat sistemin verimi  $N_e = \% 0.0000134$  olarak hesaplanmıştır.

Test aşamasında ölçüm yapılan süre zarfındaki dalga yükseklikleri boyları metre ile ölçülmüş olsada bu ölçümler kısa süreli testler için sağlıklı ve net bir sonuç vermemektedir. Bu sebeple yararlanılmış olan kaynaklardan yola çıkarak ölçüm yapılan Antalya bölgesine ait ortalama dalga yüksekliği ve Meteoroloji Genel Müdürlüğünün verileri dikkate alınarak değerlendirmeler yapılmıştır. Şekil 4.9'da verilen harita testin yapıldığı sahilin dalga yüksekliğini göstermektedir.



Şekil 4.9. Akdeniz sahili dalga yüksekliği haritası (Anonim, 2019f)

Çizelge 4.1'de verilen değerler ise akdeniz sahilinin saat dilimlerine göre hava durumu, rüzgar, dalga yüksekliği, fırtına ve görüş mesafesi hakkında bilgi vermektedir.

Çizelge 4.1. Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün Akdeniz kıyısı için fırtına, hava, rüzgar, dalga ve görüş verileri

TAURUS	06:00-12:00 TSI Arası	12:00-18:00 TSI Arası
Fırtına	Fırtına Beklenmiyor.	Fırtına Beklenmiyor.
Hava	Parçalı Bulutlu	Doğusu Az Bulutlu
Rüzgar	Doğu ve Güneydoğusundan 2 ila 4, Doğusu Kuzeydoğusundan 2 ila 4	Doğu ve Güneydoğusundan 2 ila 4, Doğusu Kuzeydoğusundan 2 ila 4
Dalga	0.5 ila 1.5 m	0.5 ila 1.5 m
Görüş	İyi	İyi

#### 4.1. Hasat sisteminin Güç Yoğunluğu Hesabı ve Diğer Sistemler ile Karşılaştırılması

Enerji hasat sistemlerinde performansının değerlendirmesi için kullanılan ölçütler sıklıkla güç yoğunluğu, güç veya enerji verimi olarak sıralanabilir. Güç yoğunluğu, enerji hasat sisteminde güç çıkış değerinin üreticinin hacmine oranıdır. Bu yöntem ile hasat sistemlerinin boyuttan bağımsız değerlendirilmesi yapılabilir (Rammohan, 2014).

Denklem 4.1’de  $P_{dens}$  güç yoğunluğunu,  $V$  sistemin hacmini ifade etmektedir.

$$P_{dens} = \frac{P_{max}}{V} \quad (\text{W/cm}^3) \quad (4.1)$$

Çizelge 4.2’de dalga yüksekliğinin zaman dilimlerindeki değişimine göre dalga gücünün değişimi verilmiştir. Dalga yüksekliğinin artması ve buna bağlı olarak artan dalga gücüne cevaben piezoelektrik hasat sisteminin üretmiş olduğu elektrik gücünün değerleri ve güç yoğunlukları verilmiştir.

Çizelge 4.2. Dalga yüksekliğinin zaman dilimlerindeki değişimine göre dalga enerjisi gücü ve piezoelektriklerin ortalama güç yoğunlukları

Zaman Dilimleri	$H_s$ Dalga Yüksekliği (m)	Dalganın Gücü (W)	PZT Ort. Gücü (mW)	Piezoelektrik Ort. Güç Yoğunluğu ( $\mu\text{W/cm}^3$ )
08:30-12:00	0.075	13.78	0	0
12:00-15:30	0.2	98.03	0.459	233.825
16:00-19:30	0.35	300.243	0.998	508.405

Çizelge 4.3’de verilen değerler çeşitli düşük frekanslı hasat sistemlerinden elde edilen güç ve güç yoğunlukları karşılaştırılmıştır. Bu tez çalışmasında elde edilen veriler de yer almaktadır.

Çizelge 4.3. Çeşitli düşük frekanslı hasatçılar tarafından üretilen ortalama güç ve güç yoğunluğunun karşılaştırılması (Rammohan, 2014).

	Daha önce gerçekleştirilmiş çalışmalardan elde edilen veriler				Bu tez çalışmasında elde edilen veriler
	Rammohan (2014) (PVDF)	Sodano (2004) (QP40N)	Lei Gu (2011) (PZT)	Arroyo (2012) (PZT)	12:00-19:30 Saatleri arası ölçümler
Ort. Güç ( $\mu\text{W}$ )	0.9	11.9	1500	3000	730
Ort. Güç Yoğunluğu ( $\mu\text{W/cm}^3$ )	12	6.1	93.2	125	370

Çizelge 4.4’de Enerji kaynaklarının yıllık ömür periyotlarına göre güç yoğunluğu bakımından kıyaslaması yapılmıştır.

Çizelge 4.4. Enerji kaynaklarının yıllık ömür periyotlarına göre güç yoğunluğu bakımından kıyaslaması (Çizelgenin üst kısmı sabit seviyede güç üretimi olan kaynakları; çizelgenin alt kısmı sabit miktarda enerji depolamalı kaynakları göstermektedir) (Roundy vd., 2003).

Enerji Kaynağı	Güç Yoğunluğu ( $\mu W/cm^3$ )	Güç Yoğunluğu ( $\mu W/cm^3$ )
	(1 Yıllık Ömür)	(10 Yıllık Ömür)
Güneş (dış mekân)	15000-Doğrudan güneş	15000-Doğrudan güneş
	150-Bulutlu gün	150-Bulutlu gün
Güneş (iç mekân)	6-Ofis masası	6-Ofis masası
Titreşim (Piezoelektrik Dönüşüm)	250	250
Titreşim (Elektrostatik Dönüşüm)	50	50
Akustik gürültü	0,003 at 75 dB	0,003 at 75 dB
	0,96 at 100 dB	0,96 at 100 dB
Isıl gradyan	15-15 °C Gradyanda	15-15 °C Gradyanda
Ayakkabı tabanı	330	330
Piller (Şarj edilemeyen lityum)	45	3,5
Piller (Şarj edilebilir lityum)	7	0
Hidrokarbon yakıt (Mikro ısı makinası)	333	33
Yakıt hücresi (Metanol)	280	28

Piezoelektrik, elektromanyetik ve elektrostatik enerji hasat metotları kıyaslandığında piezoelektrik hasatçıların enerji yoğunluğu diğerlerine göre daha iyi olması ve bu hasatçıların elektromanyetik üreteçlere nazaran aynı güç yoğunluğu için değerlendirildiğinde daha küçük boyutlara sahip olabilmesinin yanında daha düşük frekanslarda tepki verebilmesi gibi unsurlar değerlendirildiğinde piezoelektrik malzemelerin sistem içinde daha avantajlı kullanım alanları vardır.

#### 4.2. Piezoelektrik Hasat Sisteminin Yatırım Maliyeti

Günlük yaşamımızda kullanılan elektrik ikincil tür bir enerji kaynağıdır ve birincil enerji kaynaklarından üretilir. Ülkemizde doğal gaz, kömür, petrol, su, rüzgar, güneş, dalga ve diğer enerji kaynakları, kullanılan birincil enerji kaynaklarıdır.

Bu birincil kaynaklardan elektrik üretmek amacıyla kurulan tesislere santral denir. Elektrik santrallerinin kuruluş maliyetleri ortalama olarak aşağıdaki gibidir (Çizelge 4.5).

Çizelge 4.5. Elektrik santrallerinin ortalama kuruluş maliyetleri (Anonim, 2019e).

<b>Birincil Kaynak</b>	<b>Birim Maliyeti (dolar/kW)</b>	<b>1000 MW Santral Maliyeti (milyon dolar)</b>
<b>Kömür</b>	750	750
<b>Petrol</b>	650	650
<b>Doğalgaz</b>	650	650
<b>Su</b>	1000	1000
<b>Rüzgar</b>	1000	1000
<b>Güneş</b>	1300	1300
<b>Dalga (Bu tez çalışması )</b>	$2656 \times 10^6$	$2656 \times 10^6$

Elektrik santrallerinin yıllık ortalama ne kadar enerji ürettikleri bulmak için o santralin kapasite faktörünü bilmek gerekir.

Santral tiplerine göre ortalama kapasite faktörleri şöyledir:

- Nükleer: %90+
- Kömür, Gaz: %80-90
- Jeotermal: %75–80
- Biyokütle Çöp: %65–70
- Biyokütle Diğer: %50–60
- Hidro: %40–50
- Rüzgar: %20–30
- Güneş: %20–25 (Anonim, 2019d).

Piezoelektrik hasat sisteminin denizde 10 saatlik test sonucu elde edilen elektrik enerjisi saatte ortalama 3.2 mW'dir. Bu değer sistemin kurulu gücünü ( $3.2 \times 10^{-9}$  MW) göstermektedir. Çizelge 4.5'de elektrik santrallerinin kuruluş maliyetleri ortalama olarak 1 000 MW güç üretimi için kıyaslanmıştır.



Buna göre Piezoelektrik hasat sistemini bir enerji üretim tesisi (santrali) olarak düşünürsek, 1000 MW güç üretebilmesi için aynı üniteden yaklaşık 3,2 Milyar adet kurulması gerekmektedir. Bir ünitenin maliyeti 5 000 TL (yaklaşık 830 \$) olduğuna göre 3,2 Milyar adet sistemin maliyeti yaklaşık 2656 Trilyon \$ olur.

Piezoelektrik hasat sistemi yılın her günü kesintisiz güç üreteceğinden sistemin kapasite faktörü %100 alınabilir. Buna göre Piezoelektrik elektrik santralının yıllık elektrik üretimi eşitlik (4.2) ile 0.028 kWh olarak bulunabilir.

$$\% \text{ Kapasite Faktörü} = \frac{\text{Yıllık Üretilen Güç (MWh)}}{8760 \left(\frac{\text{saat}}{\text{yıl}}\right) \times \text{Kurulu Güç (MW)}} \quad (4.2)$$

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Derinliği 1 - 3 metre olan sığ sularda kullanılması amacıyla tasarlanan ve imalatı yapılan piezoelektrik enerji hasat sistemi, yapılan deneyler sonucunda elde edilen gerilim, akım ve güç değerleri dalga yüksekliğindeki değişime göre test edilmiştir. Yapılan testlerde sabah saatlerinde (08:00 - 12:00) dalga yüksekliği ortalama 7.5 cm ölçülmüştür. Bu dalga yüksekliği hasat sistemini tahrik etmeye yetmemiştir. Yapılan ölçümlerden sadece 0.409 mV'luk ortalama gerilim değerleri alınabilmektedir. Sistemden bu zaman diliminde akım ve güç değerleri alınamamıştır.

12:00 - 15:30 saatleri arasında dalga yüksekliği ortalama 20 cm olarak ölçülmüş ve yüksekliğin artışı nedeniyle dolayısıyla hasat sisteminin ürettiği ortalama gerilim 1.932 mV değerine yükseldiği görülmüştür. Dalga yüksekliğinin artması sistemde bulunan piezoelektrik malzemelere etki eden baskı kuvvetini de artırdığından bu zaman diliminde akım ve güç verileri elde edilebilmiştir. Buradan yola çıkarak tasarlanan piezoelektrik hasat sisteminin akım ve güç üretebilmesi için dalga yüksekliğinin ortalama 20 cm ve üzeri değerlerde olması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Bu zaman diliminde sistemin güç yoğunluğu  $233 \text{ } (\mu\text{W}/\text{cm}^3)$ . Sisteme giren ortalama dalga gücü  $P=98.03 \text{ } (\text{W}/\text{m})$ , sistemden elde edilen ortalama elektrik gücü ise  $P_{p-ort}=0.459 \text{ mW}$  olmuştur. Bu güç değerlerine göre 12:00 - 15:30 saatleri arasında sistemin verimi  $\% 4.68 \times 10^{-6}$  olarak hesaplanmıştır.

16:00'dan sonra yapılan testlerde ise dalga yüksekliğinin test süresince ölçülen en yüksek değer olan ortalama 35 cm seviyeleri görülmüştür. Bu saat diliminde hasat sisteminin ürettiği ortalama gerilim 2.925 mV olarak ölçülmüştür.

Bu zaman diliminde sistemin güç yoğunluğu  $508 \text{ } (\mu\text{W}/\text{cm}^3)$  Sisteme giren ortalama dalga gücü  $P=300.243 \text{ } (\text{W}/\text{m})$ , sistemden elde edilen ortalama elektrik gücü ise  $P_{p-ort}=0.998 \text{ mW}$  olmuştur. Bu güç değerlerine göre 16:00 - 19:30 saatleri arasında sistemin verimi  $\% 3.32 \times 10^{-6}$  olarak hesaplanmıştır.

Piezoelektrik hasat sistemine uygulanan dalga gücüne karşılık sistemin ürettiği elektrik enerjisi karşılaştırıldığında sistemin oldukça düşük bir verime sahip olduğu görülmüştür.

Tasarımı ve imalatı yapılan piezoelektrik enerji hasat sistemi, Rammohan'ın (2014) yaptığı araştırmada yer alan ve piezoelektrik malzeme kullanılan diğer düşük güç üretimi yapan sistemlerin güç yoğunlukları dikkate alınarak kıyaslandığında (Çizelge 4.3.), değer olarak en yakın çalışma olan Arroyo (2012)'ye göre yaklaşık %300 daha fazla güç elde edilebildiği görülmüştür. Bu açıdan farklı bir tasarım olarak denenen hasat sistemin benzerlerine göre verimli olduğu sonucuna varılmıştır.

Bu değerlendirme göz önüne alındığında düşük güç üretimi yapan sistemler kendi arasında kıyaslandığında piezoelektrik malzemeler verimli malzemeler olarak nitelendirilebilir. Fakat piezoelektrik malzemeler diğer enerji üreteçleri ile kıyaslandığında düşük verimli malzemeler olarak nitelendirilmektedir.

Genel olarak piezoelektrikli hasat sistemlerinin veriminin düşük oluşu göz önünde bulundurulduğunda ve yapılan maliyet hesaplamaları sonucunda imalatı yapılan sistemin çok uzun yıllar içerisinde kendi kendini amorte edeceği görülmüştür. Bu da enerji üretim sistemleri için kabul edilebilir bir sonuç değildir.

Piezoelektrik malzemelerin günümüz şartlarındaki mevcut durumu ve hasat sistemindeki kullanılan piezoelektrik malzemenin teknolojinin gelişimi ile zaman içerisinde daha kullanışlı ve daha yüksek güç üretimine sahip hale gelirse bu tip sistemler daha verimli çalışacaktır. Mevcut teknoloji ve malzemeler ele alındığında piezoelektrik sistemlerin yakın zamanda büyük ölçekli elektrik üretici olarak kullanılması verimli gözükmemektedir.

Bu tez çalışmasında tasarlanan hasat sisteminin maliyetini azaltıcı, dolayısıyla da verimliliğini artırıcı bazı düzenlemeler yapılabilir;

- Gövde malzemesi olarak, korozif su şartlarına dayanıklı ancak daha az maliyetli malzemeler kullanılabilir.

- Gövde parçalı olarak değil olabildiğince yekpare ve enjeksiyon döküm yoluyla seri üretimle elde edilmesi maliyetleri önemli ölçüde azaltacaktır.
- Gövde içerisine yerleştirilen piezoelektrik malzemeler daha sık ve çok katlı yerleştirilmesi verimi arttıracaktır.
- Kullanılan piezoelektrik malzeme türünün ve geometrisinin daha verimli piezoelektrik türleriyle değiştirilmesi sistem verimini arttırabilir.
- Piezoelektrik malzemelerin tetiklenme frekansını arttırıcı bazı mekanik düzenlemeler sistem verimini arttırabilir.
- Sahada yapılacak testden önce laboratuvar Şartlarında yapılacak testlerin olası birtakım tasarımı hatalarının belirlenmesi ve giderilmesinde katkı sağlayacaktır.



## KAYNAKLAR

- Anonim (2012a). <https://www.bbc.com/news/uk-scotland-17526389> (Son erişim tarihi: 28.04.2018)
- Anonim (2018a). <https://teknolojiprojeleri.com/elektronik/rms-deger-nedir> (Son erişim tarihi: 23.06.2018)
- Anonim (2018b). <http://m.turkish.ultrasonic-levelmeter.com/sale-11762033-y-ksek-hassasiyetli-malzeme-pzt5-pzt4-piezo-seramik-halka.html> (Son erişim tarihi: 23.06.2018)
- Anonim (2019a). <http://www.alternative-energy-tutorials.com/wave-energy/waveenergy-devices.html> (Son erişim tarihi: 03.10.2019)
- Anonim (2019b). <https://www.americanpiezo.com/apcmaterials/physicalpiezoelectric-properties.html> (Son erişim tarihi: 30.01.2019)
- Anonim (2019c). <http://www.designation-systems.net/dusrm/app4/wasp.html> (Son erişim tarihi: 30.01.2019)
- Anonim (2019d). [https://www.eia.gov/electricity/monthly/epmtablegrapher.php?t=e\\_pmt\\_6\\_07\\_a](https://www.eia.gov/electricity/monthly/epmtablegrapher.php?t=e_pmt_6_07_a) (Son erişim tarihi: 30.12.2019)
- Anonim (2019e). [http://www.emo.org.tr/ekler/df3320b413d8eb7\\_ek.pdf](http://www.emo.org.tr/ekler/df3320b413d8eb7_ek.pdf) (Son erişim tarihi: 30.12.2019)
- Anonim (2019f). <https://www.mgm.gov.tr/> (Son erişim tarihi: 07.02.2020)
- Anonim (2020a). <https://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Elektrik> (Son erişim tarihi: 10.01.2020)
- Anonim (2020b). <https://tr.wikipedia.org/wiki/Sonar> (Son erişim tarihi: 04.02.2020)
- Arms, C. P., Churchill D. L., Galbreath, J. H., Corneau, B., Ketcham R. P. & Phan, N., (2008). Energy Harvesting, Wireless, Structural Health Monitoring and Reporting System, 2nd Asia Pacific Workshop on SHM, Melbourne, 2-4 December (2008). [https://www.researchgate.net/publication/267805423\\_Energy\\_harvesting\\_wireless\\_structural\\_health\\_monitoring\\_and\\_reporting\\_system](https://www.researchgate.net/publication/267805423_Energy_harvesting_wireless_structural_health_monitoring_and_reporting_system) (Son erişim tarihi: 09.01.2018)
- Arroyo, E., Badel, A., Formosa, F., Wu, Y. & Qiu, J., (2012). Comparison of electro magnetic and piezoelectric vibration energy harvesters: model and experiments. [https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.elsevier-a528f584-0696-3f03-82a8f287582\\_3a6b8](https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.elsevier-a528f584-0696-3f03-82a8f287582_3a6b8) (Son erişim tarihi: 20.02.2020)
- Avşar, A. L. & Şahin, M., (2012). Piezoelektrik Malzemeler Yardımıyla Enerji Hasadı. Savunma Teknolojileri Kongresi. <https://oguzhancakmak.com.tr/wp-content/uploads/2018/09/piezoelektrik.pdf> (Son erişim tarihi: 25.02.2019)

- Burns, J. R., (1987). Ocean wave energy conversion using piezoelectric material members. <https://patents.google.com/patent/US4685296A/en> (Son erişim tarihi: 25.09.2019)
- Cai, W., (2017). Energy Harvesting from Surface River/Ocean Waves. <http://scholar.uwindsor.ca/cgi/viewcontent.cgi?article=8243&context=etd> (Son erişim tarihi: 01.10.2019)
- Carroll, C. B., (1995). Piezoelectric generator protection. <https://patents.google.com/patent/US5548177A/en> (Son erişim tarihi: 01.10.2019)
- Clément, A., McCullen, P., Falcão, A., Fiorentino, A., Gardner, F., Hammarlund, K., Lemonis, G., Lewis, T., Neilsen, K., Petroncini, S., Pontes, M. T., Schild, P., Sjöström, B. O., Sorensen, H. C. & Thorpe, T., (2002). Wave energy in Europe: current status and perspectives, Renewable and Sustainable Energy Reviews 6th ed. [https://energiatalgud.ee/img\\_auth.php/6/6e/Clement%2C\\_A.\\_Wave\\_Energy\\_in\\_Europe\\_current\\_status\\_and\\_perspectives.\\_2002.pdf](https://energiatalgud.ee/img_auth.php/6/6e/Clement%2C_A._Wave_Energy_in_Europe_current_status_and_perspectives._2002.pdf) (Son erişim tarihi: 06.03.2019)
- Çağrı, A., (2017). Dalga Enerjisi Santralleri. <https://doc.player.biz.tr/29590220-Dalga-enerjisi-santralleri.html> (Son erişim tarihi: 18.06.2019)
- Çokan, M., (2005). Dalga Enerjisi, Dalga Elektrik Santralleri [http://www.emo.org.tr/ekler/ed4d4be40dac39e\\_ek.pdf](http://www.emo.org.tr/ekler/ed4d4be40dac39e_ek.pdf) (Son erişim tarihi: 10.01. 2020)
- Doğrukol, S., (2002). Piezoelektrik Malzemelerin Bünye Denklemleri. (Yüksek Lisans Tezi Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü)
- Durmuş, C., (2007). Mersin bölgesi kıyı koruma yapılarının incelenmesi <http://libratez.cu.edu.tr/tezler/6335.pdf> (Son erişim tarihi: 29.02.2020)
- Elhalwagy, A. M., Ghoneem, M. Y. M. & Elhadidi, M., (2017). Feasibility Study for Using Piezoelectric Energy Harvesting Floor in Buildings Interior Spaces. <https://fac.ksu.edu.sa/sites/default/files/feasibilitystudyforusingpiezoelectriceenergyharvestingfloorinbuildingsinteriorspaces-sciencedirect.pdf> (Son erişim tarihi: 16.12.2019)
- Epstein, M. Y. & Taylor, G. W., (1996). Ağırlıklı, esnek piezoelektrik elemanlarla elektrik enerjisi üretimi. <https://patents.google.com/patent/US5552657A/en> (Son erişim tarihi: 12.05.2019)
- Hwang, W. S., Ahn, J. H., Jeong, S. Y., Jung, H. J., Hong, S. K., Choi, J. Y., Cho, J. Y., Kim, J. H. & Sung T. H., (2017). Design of piezoelectric ocean-wave energy harvester using swaymovement. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924424717306660> (Son erişim tarihi: 14.06.2019)
- Hoo-Jun Lee. & Dimitris, A., (1997). The Effect of Temperature Dependent Material Nonlinearities on the Response of Piezoelectric Composite Plates. <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19980017194.pdf> (Son erişim tarihi: 17.01.2019)

- Işık, O., (2013). Bilimin Gizemli Bir Elektrik Üretici, Piezoelektrik Kristal. <https://www.elektrikport.com/universite/bilimingizemlibirelektrikuretecipiezoelektrik-kristal/8730#ad-image-0> (Son erişim tarihi: 11.12.2018)
- Karagöl, E. T. & Kavaz, İ., (2017). Dünya’da ve Türkiye’de Yenilenebilir Enerji. [https://setav.org/assets/uploads/2017/04/Yenilenebilir\\_Enerji.pdf](https://setav.org/assets/uploads/2017/04/Yenilenebilir_Enerji.pdf) (Son erişim tarihi: 10.01.2020)
- Kim, Chul-Min., Kim, Chang-Il., Lee, Joo-Hee., Paik, Jong-Hoo., Cho, Jeong-Ho., Chun, Myoung-Pyo. & Jeong, Young-Hun. (2010). Design and Evaluation of a Piezoelectric Energy Harvester Produced with a Finite Element Method. <http://www.koreascience.or.kr/article/JAKO201007049665407.page> (Son erişim tarihi: 15.04.2019)
- Koç, A., Yağlı, H., Koç, Y. & Uğurlu, İ., (2018). Dünyada ve Türkiye’de Enerji Görünümünün Genel Değerlendirilmesi. [https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/6\\_dunyadaveturkiyede.pdf](https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/6_dunyadaveturkiyede.pdf) (Son erişim tarihi: 10.01.2020)
- Mert, S., (2012). Dalga Enerjisi Dönüşüm Sistemi Tasarımı ve Deneysel Çalışması. <https://docplayer.biz.tr/21465006Dalgaenerjisidonusumsistemitasarimivedeneysel-calismasi-yukseklisans-tezi-selcuk-mert-kiyi-bilimler-ve-muhendisligi-anabilim-dali.html> (Son erişim tarihi: 10.01.2020)
- Mutsuda, H., Tanaka, Y., Patel, R., Doi, Y., Moriyama, Y. & Umin, Y., (2017). A painting type of flexible piezoelectric device for ocean energyharvesting. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141118717302419> (Son erişim tarihi: 14.06.2019)
- Nabavi, S. F., Farshidianfar, A. & Afsharfard, A., (2018). Novel piezoelectric-based ocean wave energy harvesting from offshore buoys. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141118717306338> (Son erişim tarihi: 14.06.2019)
- Önal, A. T., (2016). Fonksiyonel derecelendirilmiş eğri eksenli piezoelektrik kirişlerin mekanik ve elektriksel davranışları. <http://open.access.inonu.edu.tr:8080/xmlui/handle/11616/5776> (Son erişim tarihi: 18.01.2019)
- Özada, Ç., (2015). Piezoelektrik Nedir?. <https://www.muhendisbeyinler.net/piezoelektrik-nedir-piezoelektrik-olay/> (Son erişim tarihi: 01.12.2018)
- Polat, A., (2016). Piezoelektrik Sistemli Suya Dayalı Enerji Sistemlerinin Analizi ve Uygulaması. (Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü)
- Püsgül, T., (2018). Piezoelektrik Nedir? Piezoelektrik etki nedir?. <https://muhendistan.com/piezoelektrik-nedir/> (Son erişim tarihi: 11.12.2018)
- Rammohan, S., Ramya, C. M., Jayanth Kumar, S., Anjana, J. & Rudra, P., (2014). Low Frequency Vibration Energy Harvesting using Arrays of PVDF Piezoelectric Bimorphs. <http://www.issnsonline.in/journal/03paper03.pdf> (Son erişim tarihi: 02.02.2020)

- Roundy, S., Wright, P. K. & Rabaye, J., (2003). A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes. <https://iss.mech.utah.edu/wp-content/uploads/sites/103/2012/10/ComputerCommunications-Roundy-2003.pdf> (Son erişim tarihi: 20.02.2020)
- Sağlam, M. & Uyar, T. S., (2018). Dalga Enerjisi ve Türkiye'nin Dalga Enerjisi Teknik Potansiyeli. [http://www.emo.org.tr/ekler/20bb2d9a50d5ac1\\_ek.pdf](http://www.emo.org.tr/ekler/20bb2d9a50d5ac1_ek.pdf) (Son erişim tarihi: 05.05.2018)
- Semiz, T. Y., (2018). Arduino Uno Nedir? Özellikleri ve Projeleri. <https://maker.robotistan.com/arduino-uno/> (Son erişim tarihi: 10. 01.2020)
- Sodano, H. A., Park, G. & Inman, D. J., (2004). Estimation of Electric Charge Output for Piezoelectric Energy Harvesting. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1475-1305.2004.00120.x> (Son erişim tarihi: 20.02.2020)
- Şeremet, Ö., (2019). Arduino Uno Nedir? Ne İşe Yarar? <https://ozgurseremet.com/arduino-uno-nedir-ne-ise-yarar/> (Son erişim tarihi: 10.01.2020)
- Thorpe, T. W., (1999). A Brief Review of Wave Energy. <http://www.homepages.ed.ac.uk/v1ewaveg/Tom%20Thorpe/Tom%20Thorpe%20report.pdf> (Son erişim tarihi: 10.01.2020)
- Toma, D. M., Carbonell, M., Bresco, D. P., Manuel, A. & Masalles, J. M. (2013). An impacting energy harvester through piezoelectric device for oscillating water flow. (5TH MARTECH International Workshop On Marine Technology). ISBN-13: 978-84-616-5764
- Uyar, F., (2016). Dalga Enerjisi Nedir? Dalga Enerjisinin Avantajları Nelerdir?. <https://www.enerjibes.com/dalga-enerjisi/> (Son erişim tarihi: 11.03.2018)
- Uyar, F., (2016b). Piezoelektrik Nedir? Piezoelektrik Olay Nedir?. <https://www.enerjibes.com/piezoelektrik-nedir-piezoelektrik-olayi-nedir/> (Son erişim tarihi: 01.12.2018)
- Ün, Ü. T., (2003). Dalga Enerjisi Teknolojisi, Ekonomisi, Çevresel Etkisi ve Dünyadaki Durumu [http://www.emo.org.tr/ekler/6a781dbfd8e524b\\_ek.pdf](http://www.emo.org.tr/ekler/6a781dbfd8e524b_ek.pdf) (Son erişim tarihi: 18.06 .2019)
- Vinlol, C., Toma, D., Manuel, A. & Rio, J. D., (2013). Sea motion electrical energy generator for low-power applications. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6607986> (Son erişim tarihi: 11.10.2019)
- Yıldırım, E., (2015). Piezoelektrik Malzemeler ve Nanogeneratörler. <https://malzemebilimi.net/piezoelektrik-ve-malzemeler-ve-nanogeneratörler.html> (Son erişim tarihi: 01.12.2018)
- Yükselci, F., (2016). Dalga enerjisiyle nasıl elektrik elde edilir? <https://yer-su.com/dalga-enerjisiyle-nasil-elektrik-elde-edilir/> (Son erişim tarihi: 18.06.2019)



- Zöhra, B., (2011). Aşağı-Yukarı Hareketli Dalga Enerjisi Konvertörü Modelleme ve Kontrol Uygulaması. [https://www.researchgate.net/publication/312296054\\_ASAGI\\_YUKARI\\_HAREKETLI\\_DALGA\\_ENERJISI\\_KONVERTORU\\_MODELLEME\\_VE\\_KONTROL\\_UYGULAMASI\\_FROG\\_-\\_FORM\\_2](https://www.researchgate.net/publication/312296054_ASAGI_YUKARI_HAREKETLI_DALGA_ENERJISI_KONVERTORU_MODELLEME_VE_KONTROL_UYGULAMASI_FROG_-_FORM_2) (Son erişim tarihi: 29.02.2020)
- Woo, M. S., Baek, K. H., Kim, J. H., Kim, S. B., Song, D. & Sung, T. H., (2015). Relationship between current and impedance in piezoelectric energy harvesting system for water waves. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10832-014-9971-8> (Son erişim tarihi: 02.11.2019)
- Wu, N., Wang, Q. & Xie, X. D., (2015). Ocean wave energy harvesting with a piezoelectric coupled buoy structure. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014111871500005X> (Son erişim tarihi: 14.06.2019)
- Xie, X. D., Wang, Q. & Wu, N., (2014). Energy harvesting from transverse ocean waves by a piezoelectric plate. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0020722514000755> (Son erişim tarihi: 14.06.2019)
- Xie, X., Wang, Q. & Wu, N., (2014). Potential of a piezoelectric energy harvester from sea waves. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022460X13009206> (Son erişim tarihi: 03.10.2019)

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Eftal DURGUN

Doğum Yeri ve Yılı : Isparta, 1993

Medeni Hali : Bekar

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta : eftal.durguned@hotmail.com



### Eğitim Durumu

Lise : Şehit Ali İhsan Kalmaz Anadolu Lisesi, 2012

Lisans : SDÜ, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği, 2017