



**BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı**

**PİEZOELEKTRİK SİSTEMLİ SUYA DAYALI ENERJİ  
SİSTEMLERİNİN ANALİZİ VE UYGULAMASI**

**Adem POLAT**

**Yüksek Lisans Tezi**

**Tez Danışmanı**

**Prof. Dr. Mehmet KURBAN**

**BİLECİK, 2016**

**Ref. No: 10119757**



**BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı**

**PIEZOELEKTRİK SİSTEMLİ SUYA DAYALI ENERJİ  
SİSTEMLERİNİN ANALİZİ VE UYGULAMASI**

**Adem POLAT**

**Yüksek Lisans Tezi**

**Tez Danışmanı**

**Prof. Dr. Mehmet KURBAN**

**BİLECİK, 2016**

**Ref. No: 10119757**



**BİLECİK ŞEYH EDEBALI UNIVERSITY**

**Graduate School of Science**

**Department of Energy Systems Engineering**

**ANALYSIS AND APPLICATION OF POWER SYSTEMS  
RELATED TO WATER BASED ON PIEZOELECTRIC  
SYSTEM**

**Adem POLAT**

**Thesis of Master Degree**

**Thesis Advisor**

**Prof. Dr. Mehmet KURBAN**

**BİLECİK, 2016**



**BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**YÜKSEK LİSANS**  
**JÜRİ ONAY FORMU**

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 22/06/2016 tarih ve 33 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 21/07/2016 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Adem POLAT'ın "Piezoelektrik Sistemli Suya Dayalı Enerji Sistemlerinin Analizi ve Uygulaması" başlıklı tez çalışması Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak oy birliği/oy çokluğu ile kabul edilmiştir.

**JÜRİ**

**ÜYE (tez danışmanı) : Prof. Dr. Mehmet KURBAN**

**ÜYE : Yrd. Doç. Dr. Nazım İMAL**

**ÜYE : Doç. Dr. İhsan PEHLİVAN**

**ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ**  
**ANABİLİM DALI BAŞKANI:**

**Doç. Dr. Metin KESLER**

**ONAY**

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun .../.../..... tarih ve ...../..... sayılı kararı.

**İMZA/MÜHÜR**

## TEŐEKKÖR

Çalıőmalarım süresince emek vererek katkıda bulunan ve her türlü desteği esirgemeyen tez danışmanım Prof. Dr. Mehmet KURBAN'a, yüksek lisans eğitimi ve tez sürecinde ihmal ettiğim aileme ve arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca deneylerim sırasında bana yardımcı olan arkadaşlarıma da teşekkürlerimi sunarım.

Adem POLAT

Haziran, 2016

## ÖZET

Yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi ve gerekliliği gün geçtikçe daha çok hissedilmektedir. Bunun nedeni fosil kaynakların sınırlı olması ve küresel ısınmanın büyük ölçüde sebebi olmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından olan piezoelektrik malzemelerin enerji üretimi alanında çok az kullanılıyor olması ve bu alanda yeterli çalışmaların olmaması bu çalışmaya ilham olmuştur.

Özellikle enerji yoğunluğunun fazla olduğu suya dayalı enerji sistemleri analiz edilerek piezoelektrik malzemelerin bu alanda enerji üretmesi hedeflenmiştir. Enerji yoğunluğunun en fazla olduğu deniz dalgası ve dalga enerjisi dönüşüm sistemleri analiz edilerek piezoelektrik malzemelerin bu tür sistemlere entegre edilebilirliği incelenmiştir.

Yapay dalga oluşturularak piezoelektrik malzemedan enerji üretilebilmiş ve analizleri yapılmıştır. Batı Karadeniz dalga yapısı verilerine göre örnek bir santralin yaklaşık güç üretimi hesaplanmış ve sonuçları değerlendirilmiştir. Piezoelektrik malzemelerin yakın gelecekteki kullanımları hakkında öngörude bulunulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Piezoelektrik Malzeme; Hidroelektrik Santraller; Dalga Enerjisi Dönüşüm Sistemleri;

## ABSTRACT

The importance and necessity of renewable energy sources is more felt from day by day. The main reason of this necessity is the limited fossil fuels and the increased global warming. This study is inspired by the fact that the piezoelectric material from renewable energy sources, is used little in the energy production area and there is no adequate work in this area.

By analyzing the hydro-energy systems including too much energy density especially, it is aimed the energy production by the piezoelectric material in this area. Integrating the piezoelectric materials to these systems was investigated by analyzing sea wave that has the most energy intensity and the wave energy conversion system.

In this study, it was produced energy from piezoelectric materials by forming the artificial wave, and the analyses was done. According to the wave structure data of Western Black Sea, the power production of a power plant was calculated and their results were evaluated. As a result of this study, the usage of the piezoelectric materials in the future works was predicted.

**Keywords:** Piezoelectric Material; Hydroelectric Power Plants; Wave Energy Conversion Systems;

## İÇİNDEKİLER

### JÜRİ ONAY FORMU

### TEŞEKKÜR

<b>ÖZET.....</b>	<b>i</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>ii</b>
<b>İÇİNDEKİLER .....</b>	<b>iii</b>
<b>SİMGELER ve KISALTMALAR .....</b>	<b>vi</b>
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ .....</b>	<b>vii</b>
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ .....</b>	<b>viii</b>
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
<b>2. PİEZOELEKTRİK VE PİEZOELEKTRİK KRİSTALLERLE ENERJİ HASADI .....</b>	<b>3</b>
2.1. Piezoelektrik.....	3
2.2. Piezoelektrik Kristallerle Enerji Hasadı.....	4
2.3. Piezoelektrik Seramikler .....	11
<b>3. SUYA DAYALI ENERJİ SİSTEMLERİ .....</b>	<b>16</b>
3.1. Hidroelektrik Santraller.....	16
3.1.1. Hidroelektrik santrallerin sınıflandırılması .....	16
3.1.2. Düşülerine göre .....	16
3.1.3. Ürettikleri enerjinin karakter ve değerine göre .....	17
3.1.4. Üretim kapasitelerine göre .....	17
3.1.5. Yapılarına göre.....	17
3.1.6. Üzerinde kuruldukları suyun özelliklerine göre.....	17
3.1.6.1. Nehir santraller.....	17
3.1.6.2. Kanal santraller .....	18
3.1.6.3. Baraj santraller .....	19
3.1.6.4. Pompaj rezervuarlı santraller .....	20
3.2. Küçük Hidroelektrik Santraller .....	20
3.2.1. Büyük ölçekli hidroelektrik sistemler .....	21
3.2.2. Küçük ölçekli hidroelektrik sistemler .....	21
3.2.3. Mini ölçekli hidroelektrik sistemler .....	22
3.2.4. Mikro ölçekli hidroelektrik sistemler.....	22
3.3. Deniz ve okyanus kaynaklı enerji sistemleri.....	25
3.3.1. Deniz akıntısı enerji dönüşüm sistemleri .....	25

<b>4. DALGA ENERJİSİ DÖNÜŞÜM SİSTEMLERİ .....</b>	<b>27</b>
4.1. Kıyı Şeridi Uygulamaları .....	28
4.1.1. Salımlı su kolonu (OWC:Oscillating Water Column) .....	28
4.1.2. Daralan kanal sistemi .....	30
4.1.3. Sarkaç tipi dönüşüm sistemi (PENDULAR).....	31
4.2. Yakın kıyı tipi uygulamalar .....	32
4.2.1. Osprey .....	32
4.2.2. Danimarkalı dalga şamandırası enerji dönüşüm sistemi.....	33
4.2.3. Oceanlinx .....	34
4.2.4. McCabe dalga pompası .....	35
4.2.5. OPT dalga enerji dönüşüm sistemi .....	36
4.2.6. Pelamis dalga enerjisi dönüşüm sistemi.....	37
4.2.7. Dalga ejderi .....	39
4.2.8. Doğrusal generatörlü şamandıra enerji dönüşüm sistemi .....	40
4.2.9. Dalga paleti (Wave Roller) enerji dönüşüm sistemi .....	41
4.2.10. Arşimet dalga salınımı enerji sistemi (ADS) .....	42
4.2.11. Büyük balina enerji dönüşüm sistemi (Mighty Whale) .....	43
4.2.12. Salter's duck enerji dönüşüm sistemi.....	45
4.2.13. Modüler şamandıra (power buoy) enerji dönüşüm sistemi.....	46
4.2.14. Hortum pompası dalga enerjisi dönüşüm sistemi .....	47
4.2.15. Kaimei Enerji Dönüşüm Sistemi.....	48
4.2.16. Dalga Botu ve Kırkayak Duba Modeli Enerji Dönüşüm Sistemi .....	49
4.3. Dalga enerjisi dönüşüm sistemlerinin çeşitliliği .....	52
4.3.1. Dalga enerjisi dönüşüm sistemlerinin olumlu yönleri .....	52
4.3.2. Dalga enerjisi dönüşüm sistemlerinin olumsuz yönleri .....	53
<b>5. DALGA ENERJİSİ VE HESABI .....</b>	<b>55</b>
5.1. Dalga Enerjisi Kavramı.....	55
5.1.1. Dalgaların Genel Özellikleri .....	56
5.1.2. Dalga enerjisinin hesabı .....	58
<b>6. DENEYSEL UYGULAMA VE DEĞERLENDİRME .....</b>	<b>61</b>
6.1. Deney Düzenineğin Belirlenmesi .....	61
6.2. Deney Düzenineği .....	61
6.3. Deneyin Uygulaması ve Aşamaları.....	64
6.3.1. Deney uygulaması 1 .....	64
6.3.2. Deney uygulaması 2 .....	65
6.3.3. Deney uygulaması 3 .....	66

6.4. Deney Sonuçları ve Değerlendirme .....	68
6.4.1. Deney uygulaması 1 sonuçları .....	68
6.4.2. Deney aşama 2 sonuçları.....	69
6.4.3. Deney aşama 3 sonuçları.....	70
6.4.4. Deney aşama 1-2-3 sonuçları karşılaştırması.....	71
6.5. Deney Sonuçlarınının Değerlendirilmesi .....	71
6.5.1. Tartışma.....	72
6.6. PZT Malzeme Kullanarak Kurulabilecek Santralin Yaklaşık Güç Hesabı ve Maliyeti .....	72
<b>7. SONUÇ.....</b>	<b>77</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>79</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b>	

## SİMGELER ve KISALTMALAR

<b>vd</b>	:Ve diğerleri
<b>Bkz.</b>	:Bakınız
<b>kg</b>	:Kilogram
<b>PZT</b>	:Kurşun zirkonat titanat
<b>PVDF</b>	:Polyvinylidene difluoride
<b><math>d_{ij}</math></b>	:Piezoelektrik yük sabitesi
<b><math>g_{ij}</math></b>	:Piezoelektrik voltaj sabitesi
<b>DC</b>	:Doğru akım
<b>AC</b>	:Alternatif akım
<b>MPB</b>	:Morfotropik faz sınırı
<b>HES</b>	:Hidro elektrik santral
<b>H</b>	:Dalga yüksekliği
<b><math>H_s</math></b>	:Belirgin dalga yüksekliği
<b><math>H_{min}</math></b>	:Minimum dalga yüksekliği
<b><math>H_0</math></b>	:Ortalama dalga yüksekliği
<b><math>H_{rms}</math></b>	:Dalga yüksekliği mutlak değeri
<b>H1/10</b>	:En yüksek %10 dalganın ortalama yüksekliği
<b>H1/20</b>	: En yüksek %20 dalganın ortalama yüksekliği
<b>H1/30</b>	: En yüksek %30 dalganın ortalama yüksekliği
<b>L</b>	:Dalga boyu
<b>T</b>	:Dalga periyodu
<b><math>T_{min}</math></b>	:Minimum dalga periyodu
<b>T1/10</b>	:En yüksek %10 dalganın ortalama periyodu
<b><math>T_s</math></b>	:Belirgin dalga periyodu
<b>C</b>	:Dalga yayılma hızı
<b>t</b>	:Süre
<b>W</b>	:Watt
<b><math>\mu W</math></b>	:Mikrowatt
<b>mW</b>	:Miliwatt
<b>kW</b>	:Kilowatt
<b>kWh</b>	:Kilowatt saat
<b>MW</b>	:Megawatt
<b>MWh</b>	:Megawatt saat
<b>GW</b>	:Gigawatt
<b>OECD</b>	:Organisation for economic co-operation and development
<b>OWC</b>	:Oscilating water coulumn
<b>OPT</b>	:Ocean power technologies
<b>WEC</b>	:Wave energy conversion
<b>PWP</b>	:Pelamis wave power
<b>WD</b>	:Wave dragon
<b>a</b>	:Dalga genliği
<b><math>\rho</math></b>	:Özgül kütle

**ÇİZELGELER DİZİNİ****sayfa**

<b>Çizelge 1.1.</b> Güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi ve dalga enerjisi kW/m <sup>2</sup> başına.....	1
<b>Çizelge 2.1.</b> PVDF ve PZT'nin özellikleri. ....	6
<b>Çizelge 2.2.</b> Çeşitli titreşim kaynakları için titreşim ivmesinin genliği ve temel titreşim modunun frekansı (Roundy, vd., 2003).....	9
<b>Çizelge 2.3.</b> Perovskit malzemede kullanılan katkılar.....	15
<b>Çizelge 5.1.</b> Açık deniz dalga karakteristik yükseklikleri (Kabdaşlı, 1992). ....	57
<b>Çizelge 6.1.</b> Analizi yapılan piezoelektrik malzemeler. ....	64
<b>Çizelge 6.2.</b> Kare tipi PZT malzemenin zamana bağlı çıkış gerilimleri.....	68
<b>Çizelge 6.3.</b> Disk tipi PZT malzemenin zamana bağlı çıkış gerilimleri. ....	69
<b>Çizelge 6.4.</b> Disk tipi PZT malzemenin zamana bağlı çıkış gerilimleri. ....	70
<b>Çizelge 6.5.</b> Kurulması hedeflenen santralin yaklaşık maliyeti.....	76

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### sayfa

Şekil 2.1. Piezoelektrik kristalin basınç ve gerilme durumlarında kutuplanması.....	4
Şekil 2.2. İnsan vücudunun değişik bölgelerinden hasat edilebilecek enerji miktarları...5	
Şekil 2.3. Enerji hasadı için kullanılan şerit tipi piezoelektrik malzemenin hareketi.....	8
Şekil 2.4. Tekil bir ankastre kirişin şematik yapısı.....	10
Şekil 2.5. Şekil 2.4.'te gösterilen sistemin, tahrik frekansına karşılık çıkış voltajı.....	10
Şekil 2.6. Piezoelektrik malzemenin generatör ve motor davranışı.....	12
Şekil 2.7. Perovskit yapısı (Heartling, 1999).....	13
Şekil 2.8. PZT katı çözeltilisinde faz dönüşümleri (Heartling, 1999). ....	14
Şekil 3.1. Nehir santrali şeması (Yıldız, 1992).....	18
Şekil 3.2. İsale kanalı santraller (Mosonyi, 1991). ....	19
Şekil 3.3. Hidrolik çevrim (Olgun, 2009).....	21
Şekil 3.4. Hidroelektrik santrallerde düşü kavramı (Olgun, 2009).....	23
Şekil 3.5. Düşü farkı ile çalışan mikro santral (Olgun, 2009). ....	24
Şekil 3.6. Depolamasız (1) ve depolamalı (2) Mikro hidroelektrik santraller. ....	25
Şekil 3.7. Su akıntısı türbinleri. ....	26
Şekil 4.1. OWC dalga enerjisi dönüşüm sistemi kesiti.....	29
Şekil 4.2. OWC dalga enerjisi dönüşüm sistemi.....	30
Şekil 4.3. Limpet OWC (Clément, vd., 2002). ....	30
Şekil 4.4. Daralan kanal (TAPCHAN) sistemi. ....	31
Şekil 4.5. Pendular sisteminin şematik gösterimi. ....	32
Şekil 4.6. OSPREY şeması ve görüntüsü. ....	33
Şekil 4.7. Danimarkalı dalga şamandırası enerji dönüşüm sistemi. ....	33
Şekil 4.8. Oceanlinx (Peswiki, 2010).....	34
Şekil 4.9. Oceanlinx iletim hattı. ....	34
Şekil 4.10. ENERGETECH firmasının OWC sistemi (Hagerman ve Bedard, 2003). ...	35
Şekil 4.11. McCape dalga pompası.....	36
Şekil 4.12. OPT enerji dönüşüm sistemi.....	37
Şekil 4.13. Pelamis sistemi ve kısımları. ....	38
Şekil 4.14. Dalga ejderi (Wave Dragon) kısımları. ....	39

Şekil 4.15. Dalga ejderi (Wave Dragon) görüntüsü.....	40
Şekil 4.16. Doğrusal generatörlü dalga şamandırası.....	41
Şekil 4.17. Dalga paleti enerji dönüşüm sisteminin çalışma prensibi. ....	41
Şekil 4.18. Dalga paleti görüntüsü.....	42
Şekil 4.19. Arşimet dalga salınımı sistemi. ....	43
Şekil 4.20. Büyük balina enerji dönüşüm sistemi (Clément vd., 2002).....	44
Şekil 4.21. Büyük balina enerji sisteminin şematik görünümü (Clément vd., 2002). ....	44
Şekil 4.22. Salter duck enerji dönüşüm sistemi. ....	45
Şekil 4.23. Salter duck görünümü.....	46
Şekil 4.24. Power buoy sistemi ve görüntüsü. ....	46
Şekil 4.25. Power buoy kümesi (Rodrigues,2005). ....	47
Şekil 4.26. Hortum pompası enerji dönüşüm sistemi. ....	48
Şekil 4.27. Kaimei enerji dönüşüm sistemi. ....	49
Şekil 4.28. Dalga botu (Wave Boat). ....	50
Şekil 4.29. Dalga botu ve kırkayak modelinin kara versiyonu. ....	50
Şekil 4.30 Kırkayak duba enerji dönüşüm sistemi.....	51
Şekil 4.31. Fırtınalı havalarda dubaların sabitlenmesi. ....	51
Şekil 4.32. Kırkayak duba enerji dönüşüm sistemi.....	52
Şekil 5.1. Dalgada depolanan kinetik ve potansiyel enerji (Uygur, vd.,2004). ....	56
Şekil 5.2. Dalganın karakteristiği (Uygur, vd., 2004).....	57
Şekil 5.3. Su yüzeyi profili örneği (Kabdaşlı vd.,2007). ....	58
Şekil 5.4. Dalga spektrumu (Kabdaşlı vd. 2007). ....	58
Şekil 6.1. Deney düzeneğinin şematik görüntüsü. ....	62
Şekil 6.2. Deney düzeneğinin görüntüsü. ....	62
Şekil 6.3. Deney düzeneğinin görüntüsü .....	63
Şekil 6.4. Deneylerde kullanılan Piezoelektrik malzemeler. ....	64
Şekil 6.5. Kare tipi PZT malzemenin silindir ile kaide arasındaki görüntüsü. ....	65
Şekil 6.6. Disk tipi PZT malzemenin silindir ile kaide arasındaki görüntüsü. ....	66
Şekil 6.7. Blok tipi PZT malzemenin silindir ile kaide arasındaki görüntüsü. ....	67
Şekil 6.8. Kare PZT gerilim çıkışları 0,5 sn aralıklarla. ....	68
Şekil 6.9 Disk PZT voltaj çıkışları 0,5 sn aralıklarla. ....	69
Şekil 6.10. Blok PZT voltaj çıkışları 0,5 sn aralıklarla.....	70

<b>Şekil 6.11.</b> Kare, disk ve blok PZT malzemelerin voltaj çıkışlarının karşılaştırılması. .	71
<b>Şekil 6.12.</b> Kurulması hedeflenen platformun görüntüsü. ....	73
<b>Şekil 6.13.</b> Bölgelerin yıllık ortalama dalga enerjileri kWh/m.yıl (Varol, 2013). ....	74
<b>Şekil 6.14.</b> Kurulması hedeflenen santralin diyagram olarak gösterilmesi. ....	75

## 1. GİRİŞ

Enerji, hayat kalitesini artıran, ekonomik ve sosyal ilerlemeyi sağlayan en önemli faktördür. Teknolojik gelişmenin olmazsa olmazıdır. Fakat artan enerji fiyatları, küresel ısınma, dünya enerji talebindeki artış, hızla tükenmekte olan fosil yakıtlara bağımlılığın yakın gelecekte devam edecek olması, yeni enerji teknolojileri alanındaki gelişmelerin artan talebi karşılayabilecek ticari gelişimden henüz uzak oluşu, ülkelerin enerji arz güvenliği konusundaki kaygılarını her geçen gün daha da artırmaktadır. Gelişmiş ülkelerin ve gelişmekte olan bazı ülkelerin, yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik yatırımları artıyor olsa da yeterli olmamaktadır.

Yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik çalışmalar, rüzgâr enerjisi ve güneş enerjisi ağırlıklı olsa da suya dayalı enerji sistemlerinin yakın gelecekte enerji üretme payı oldukça yüksek olacaktır. Hali hazırdaki barajların enerji üretimine katkısı oldukça yüksektir. Bunun yanında, deniz akıntısından, akarsu akıntısından ve deniz dalgasından enerji üretim çalışmaları sonucunda suya dayalı enerji sistemlerinin potansiyeli oldukça yüksek olduğu ortaya çıkmıştır. Özellikle dalga enerjisine yönelik çalışmalar önem arz etmektedir. Bunun nedeni dalga enerjisinin taşıdığı enerji miktarıdır (Bkz. Çizelge 1.1).

**Çizelge 1.1.** Güneş enerjisi, rüzgâr enerjisi ve dalga enerjisi kW/m<sup>2</sup> başına.

Enerji Türü	Üretim Miktarı kW/m <sup>2</sup>
Güneş enerjisi	0,1-0,2 kW/m <sup>2</sup>
Rüzgâr enerjisi	0,4-0,6 kW/m <sup>2</sup>
Dalga enerjisi	2-3 kW/m <sup>2</sup>

Suya dayalı enerji sistemlerinde, enerji dönüşümleri incelendiğinde elektrik enerjisi üretim aşamasına kadar bir ya da daha fazla enerji çeşidi geçişi olmaktadır. Bu durumda her enerji çeşidi geçişi, enerji kaybına neden olmaktadır. Enerji kayıplarını en aza indirmek için çeşitli projeler enerji geçiş çeşidini en aza indirmek için geliştirilmektedir. Bu çalışma çeşitlerinden olan ve henüz çok yeni olan, kullanılabilirliği çok az denenmiş olan piezoelektrik materyal ile enerji hasadı yöntemleridir. Piezoelektrik kristallerle birçok yöntemle enerji üretimi yapmak mümkündür. En büyük avantajı mekanik enerjeyi doğrudan elektrik enerjisine

çevirebilmesidir. Suyu dayalı enerji sistemlerinin birçoğu ile bütünleşebilir olması dikkatleri üzerine çekmektedir.

Literatürde piezoelektrik malzeme kullanılarak suya dayalı sistemlerden enerji elde etme yönünde bir çalışma mevcuttur. Bu çalışma dışında yayınlanmış bir çalışma yoktur. Bunun nedeni piezoelektrik malzemelerin genellikle titreşim tabanlı olmasından ve enerji üretimi amacı taşımamasından kaynaklanabilir.

Pobering ve Schwesinger (2004)'de gerçekleştirdikleri çalışmada PZT bimorph yapıları su akışı içerisinde kullanarak  $68,1\text{W/m}^3$  güç yoğunluğu elde edilebileceğini göstermişlerdir. Rüzgâr türbinleri ile elde edilebilecek güç yoğunluğu ise ancak  $34\text{W/m}^3$  olarak belirlenmiştir.

Bu tez çalışmasında, 2. Bölümde piezoelektrik materyal yapıları, ne tür maddeler içerdiği, enerji üretme şekilleri ve enerji hasadı yöntemlerinden bahsedilmiştir. 3. Bölümde ise suya dayalı enerji sistemleri hakkında genel bilgiler verilmiştir. Tez çalışmamızda da kullandığımız dalga enerjisi nedeniyle, ayrı başlık altında 4. Bölümde, dalga enerjisi dönüşüm sistemleri hakkında geniş bilgiler verilmiştir. 5. Bölümde ise dalga enerjisinin oluşumu, taşıdığı enerji ve dalga enerjisinin hesaplanmasından bahsedilmiştir. 6. Bölümde dalga enerjisi kullanarak deneysel uygulama ve sonuçları değerlendirilmiştir. Son olarak 7. Bölümde tez çalışmasının sonucu değerlendirilmiş konuyla ilgili öngörü ve tavsiyelerde bulunulmuştur.

## **2. PİEZOELEKTRİK VE PİEZOELEKTRİK KRİSTALLERLE ENERJİ HASADI**

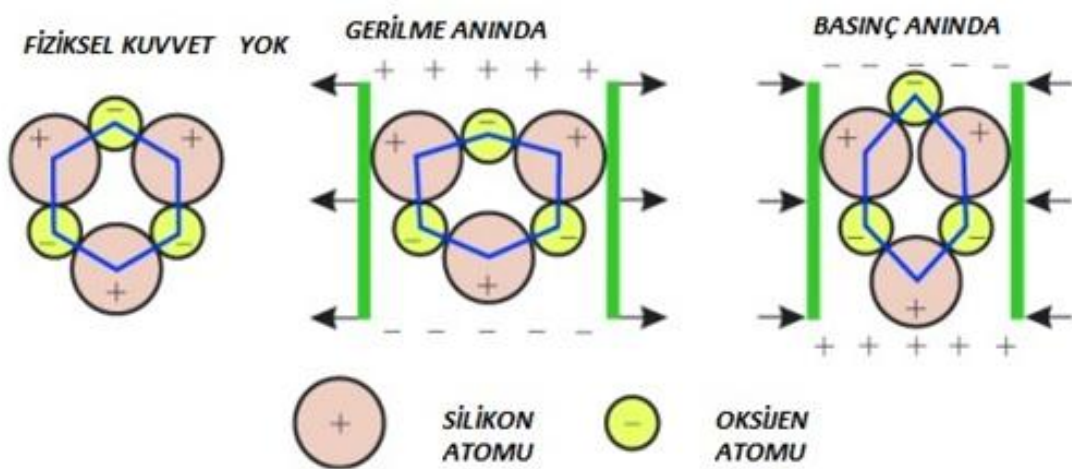
### **2.1. Piezoelektrik**

Piezoelektrik etkisinin varlığı çok uzun yıllardan buyana bilinir ancak yeni yeni kullanılmaya başlayan bir geçmişe sahiptir. 1880 yılında Jaques Pierre Curie, temel bazı kristal minerallerin, olağan dışı karakteristik gösterdiklerini saptamışlardır. Bu kristallere mekanik bir güç uygulandığında, kristaller elektriksel olarak kutuplaşıyorlardı. Sıkışma ve gerginlik durumlarında, uygulanan kuvvet miktarı kadar uçları arasında elektriksel kutuplaşma oluyordu. Sonradan, bu ilişkinin tam tersi de kanıtlandı. Eğer bu kristal mineraller bir elektrik alanına tabi tutulursa, elektrik alanının gücü kadar kısalıp, uzayabiliyorlardı. Bu duruma, Yunancadaki piezin (basınç veya sıkıştırma anlamına gelen) kelimesinden esinlenerek piezoelektrik etki ve ters piezoelektrik etki ismi verildi. Her ne kadar piezoelektrik gerilim değerleri, hareketleri veya güç değerleri düşük olsa da ve genellikle yükseltmeye ihtiyaç duysalar da, piezoelektrik malzemeler günümüzde birçok uygulamada kullanılmaktadır. Piezoelektrik etki uzanım veya kuvvet sensörleri gibi algılama uygulamalarında kullanılmaktadır.

Ters piezoelektrik etki ise önceden kontrol pozisyonlandırılması yapılmış motorlarda, sonik ve ultrasonik sinyallerin üretilmesindeki gibi tahrik uygulamalarında kullanılmaktadır. 20. Yüzyılda, metal-oksit tabanlı piezoelektrik seramikler ve diğer insan yapımı materyaller aracılığı ile tasarımcılar, piezoelektrik etkiyi ve ters piezoelektrik etkiyi birçok yeni uygulamada kullanabilme olanağına kavuşmuştur. Bu materyaller genellikle fiziksel olarak sert ve kimyasal olarak tepkimeye girmeyen materyallerdir ve üretimi görece olarak daha ucuzdur. Piezo seramik elementlerin alaşımları, şekilleri ve boyutları, özel uygulamalara hizmet edebilmesi için uygun hale getirilebilmektedir. Kurşun zirkonat ve kurşun titan alaşımlarından üretilen seramikler, diğer seramiklere göre daha duyarlı ve daha yüksek sıcaklık değerlerinde çalışabilmektedir.

Kutuplu piezoelektrik seramik malzemeye, mekanik basınç veya germe işlemi uygulandığında bu malzeme çift kutuplu hale geçmektedir ve gerilim değeri

üretmektedir. Polarizasyon doğrultusunda basınç işlemi veya polarizasyon doğrultusuna dik doğrultuda germe işlemi uygulanırsa aynı polarizasyon şeklinde gerilim elde edilmektedir (Bkz. Şekil 2.1). Piezoelektrik seramik üzerinde yapılan bu uygulamalar enerji üretim hareketidir ve seramik eleman basınç ve gerginlik durumlarındaki mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevirebilmektedir. Bu etki; yakıt ateşleme cihazlarında, katı hal bataryalarda, kuvvet algılama cihazlarında ve bu prensiple çalışan sensörlerde kullanılmaktadır.



**Şekil 2.1.** Piezoelektrik kristalin basınç ve gerilme durumlarında kutuplanması.

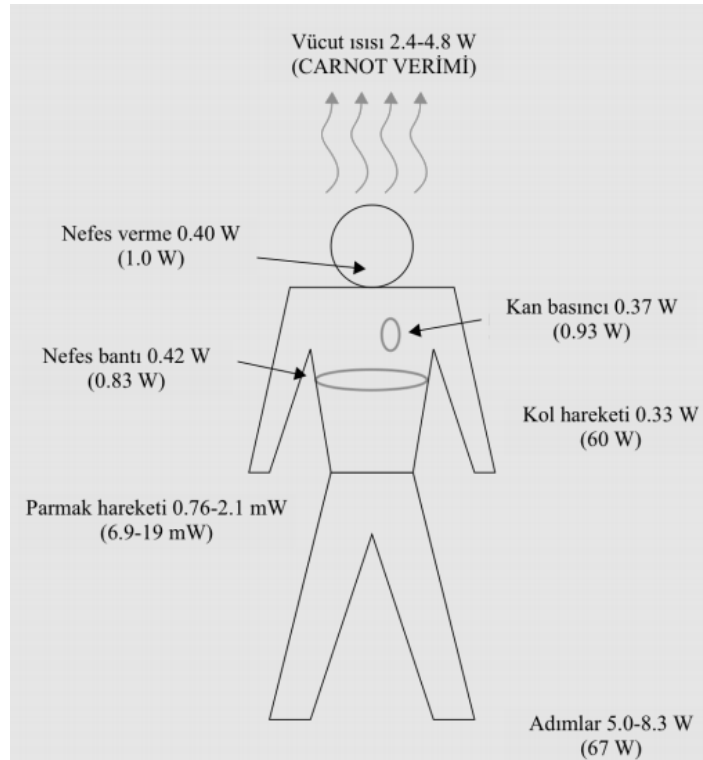
Piezoelektrik materyallerin en temel kullanım şekillerinden biri de kişisel enerji üreticileri olarak kullanılmalarıdır. Piezoelektrik materyaller, cep telefonlarına, MP3 oynatıcılara, RC cihazlara vs.. yetecek kadar enerji üretebilmektedir. Piezoelektrik materyal ile enerji hasadı yapmanın ise tarihten günümüze birçok değişik yöntem kullanılagelmiştir (Polat, 2015).

## 2.2. Piezoelektrik Kristallerle Enerji Hasadı

Geçmişten günümüze piezoelektrik materyal ile enerji hasadı elde etmek için birçok yöntem kullanılmış ve geliştirilmiştir. Genel olarak titreşim ana enerji kaynağı olmaktadır. Titreşimden enerji elde etmekte en yaygın kullanılan yöntemlerden biri piezoelektrik materyal kullanılarak mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmektir. Bu konudaki en eski çalışmalardan biri Häsler ve arkadaşları tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada bir köpeğin göğüs kafesine yerleştirilen piezoelektrik bir implant

yardımıyla enerji hasadı gerçekleştiren çalışmadır. Çalışma sonucunda  $17\mu W$ 'lık bir güç elde edilmiştir (Häsler, vd., 1984).

Piezoelektrik malzemeleri kullanarak insan vücudunun çeşitli bölgelerinden enerji elde etme (Bkz. Şekil 2.2); bu enerjiyi, giyilebilir ve kablosuz veri iletebilir bilgisayarlarda kullanma fikrini ele alan Starner ayakkabı içine yerleştirilmiş bir piezoelektrik polimer (PVDF) taban ile 52 kg. ağırlığında bir insanın 5W elektriksel güç üretebileceğini öngörmüştür (Starner, 1996).



**Şekil 2.2.** İnsan vücudunun değişik bölgelerinden hasat edilebilecek enerji miktarları.

Starner'ın bu uygulaması aynı zamanda ayakkabı tasarımına her koşulda uyum sağlayabilecek esnek bir yapıya sahip olduğu için maliyet açısından da avantajlıdır. Starner aynı zamanda giyilebilir ve kablosuz bağlantı kurulabilir nitelikte klavyelerinde veri iletebilmek için gereken elektrik enerjisinin, klavye tuşlarına basıldığında uygulanan basıncın piezoelektrik etki ile elektrik enerjisine dönüştürülmesi sonucu elde edilebilir olduğunu vurgulamıştır. Bu tip uygulamalarda kullanılması önerilen piezoelektrik polimer malzeme ile PZT'nin (kurşun zirkonat titanat) temel bazı özelliklerinin karşılaştırılması da Starner tarafından yapılmıştır (Bkz. Çizelge 2.1). PVDF akustik empedans uyumu açısından avantajlı olmasına rağmen piezoelektrik

özelliğ açısından PZT seramikler açık ara öndedir. Empedans uyumu sağlayabilecek sistemlerin geliştirilmesiyle PZT seramiklerden çok daha fazla verim alınabilir. Piezoelektrik yük sabitesi ( $d_{ij}$ ) ve piezoelektrik voltaj sabitesinin ( $g_{ij}$ ) enerji hasadı uygulamalarında en etkin faktörler olduğu göz önüne alındığında PZT'nin PVDF'e göre birçok durumda daha avantajlı olduğu görülebilmektedir.

**Çizelge 2.1.** PVDF ve PZT'nin özellikleri.

Özellik	Birim	PVDF	PZT
Yoğunluk	$\frac{g}{cm^3}$	1,78	7,6
Bağıl Geçirgenlik	$\frac{\epsilon}{\epsilon_0}$	12	1700
Elastik Modül	$10^{10} \frac{N}{m}$	0,3	4,9
Piezoelektrik Yük Sabitesi	$10^{-12} \frac{C}{N}$	$-d_{31} = 20$ $d_{33} = 30$	$-d_{31} = 180$ $d_{33} = 360$
Bağlaşma Sabitesi	$\frac{CV}{Nm}$	0,11	$k_{31} = 0,35$ $k_{31} = 0,69$

5,6 gr. ağırlığında bir çelik bilyenin 27mm çapında, 0,25mm kalınlığında bronz disk ve 19mm çapında, 0,25mm kalınlığında bir piezoelektrik seramikten oluşan kompozit yapının üzerinde zıplatılmasıyla elektrik üretilebilmiş ve %35 verime ulaşılmıştır. Bu durum, o sırada kullanılmakta olan güneş hücresinin veriminin 3 katından daha fazladır. Bu çalışmada aynı zamanda, enerji hasadı devresinin bileşenlerinin de elde edilen enerji açısından oldukça önemli olduğu belirtilmiştir (Umeda, vd., 1997).

Piezoelektrik materyalden enerji hasadı ile anlık üretilen enerjinin birçok cihaz için yeterli değildir. Bu nedenle enerjinin ancak depolanarak kullanılması durumunda yaygın kullanım alanı bulabileceği görülmüştür. Ayrıca, piezoelektrik materyal kullanarak enerji hasadı uygulamalarında elde edilen enerjinin, kullanılan malzemeler

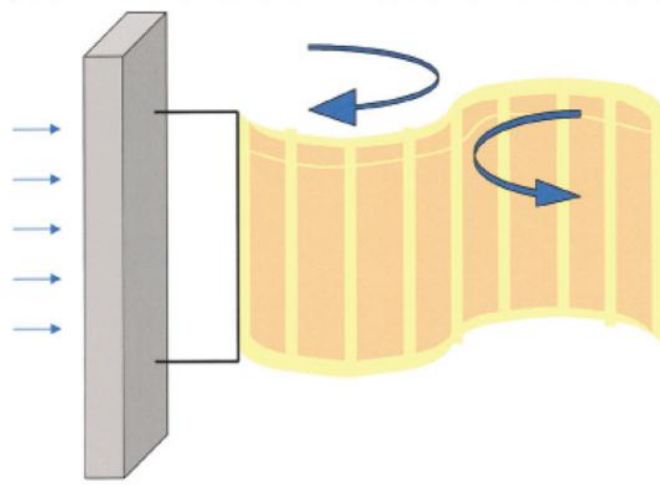
kadar, süreç sırasında elde edilen enerjiyi, akülerde depolanabilecek hale getiren ve depolayan elektronik devrelere de bağlı olduğu görülmektedir (Tüfekçioğlu, E., 2014).

Bu çalışmaların sonucunda enerji hasadı konusunda ticari ürünlerin tasarım ve üretim çalışmaları başlatılmıştır. Kurşun zirkonat titanat (PZT) fiber ve polimer matris ile oluşturulan ticari kompozit malzemeler kullanılarak 22 Hz frekanslı ve 1,4mm genlikli bir titreşim ortamında 125mW kesintisiz güç elde etmenin mümkün olabileceği belirlenmiştir (Mohammadi, vd., 2003).

PZT-pirinç diyafram transdüser kullanılarak 1,71 kHz titreşim frekansında 0,65 mW güç üretilebilmiştir. Söz konusu çalışmadaki önemli başka bir tespit ise SSHI (synchronized switch harvesting on inductor) tekniği kullanılarak, üretilen enerjinin tınlaşım frekansında yaklaşık 3 katına (1,7 mW) çıkmasıdır. Bu da kullanılan teknik ve tasarımın enerji hasadı uygulamalarında ne denli önemli olduğunu bir kere daha göstermiştir (Minazara, vd., 2006).

Bu sonuçların verilerine göre DC/DC dönüştürücü ve bir kontrol algoritması kullanarak değişken titreşim davranışlarına uyum sağlayan bir piezoelektrik enerji hasadı devresi oluşturmuşlardır. Bu tür sistemler öngörülen titreşim karakteristiğine göre iyileştirilebilecek tasarımları olanaklı kılmaktadır (Ottman, vd., 2002).

Titreşim kaynaklarından enerji hasadı çalışmalarına paralel olarak akışkanların kinetik enerjilerini elektrik enerjisine piezoelektrik malzemeleri kullanarak dönüştürme çalışmaları da son yıllarda yoğunluk kazanmıştır. Kapsamlı çalışmalardan ilki Taylor ve arkadaşları tarafından, akış sırasında yapının önünde bulunan bloğun oluşturduğu vorteksin, piezoelektrik levhaları hareket ettirmesi prensibine dayanılarak inşa edilmiş olan (Bkz. Şekil 2.2) enerji hasat ünitesidir (Taylor, vd., 2001).



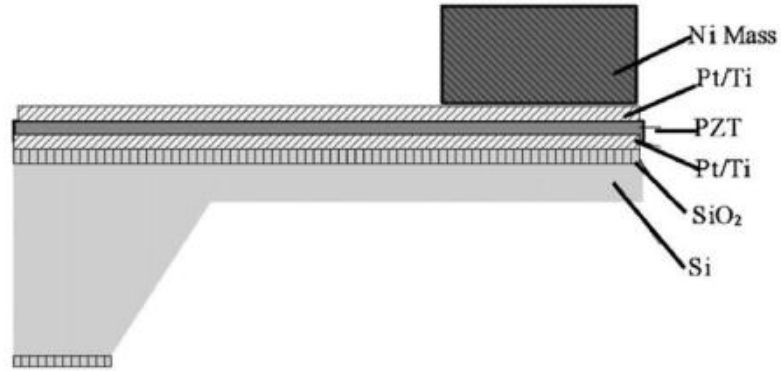
**Şekil 2.3.** Enerji hasadı için kullanılan şerit tipi piezoelektrik malzemenin hareketi.

Sebastian Pobering ve Norbert Schwesinger 2004 yılında gerçekleştirdikleri çalışmada PZT bimorph yapıları su akışı içerisinde kullanarak  $68,1\text{W/m}^3$  güç yoğunluğu elde edilebileceğini göstermişlerdir. Rüzgâr türbinleri ile elde edilebilecek güç yoğunluğu ise ancak  $34\text{W/m}^3$  olarak belirlenmiştir (Pobering, vd., 2004). Bu çalışmada kullanılan sistemlerin bir avantajı da hareketli parça içermemeleri, dolayısıyla bakıma gerek duymayacak sistemlerin tasarımını imkânlı hale getirmeleridir. Bu tür malzemelerin kullanım alanları günümüzde artmaktadır. bunun nedeni titreşim tabanlı olmalarıdır. Günlük yaşantımızda sıkça kullandığımız ürünlerde oluşan titreşimler çizelge 2.2.'de görülmektedir. Otomobillerin motor bölümünde oluşan titreşimler ve frekansları oldukça dikkat çekmektedir.

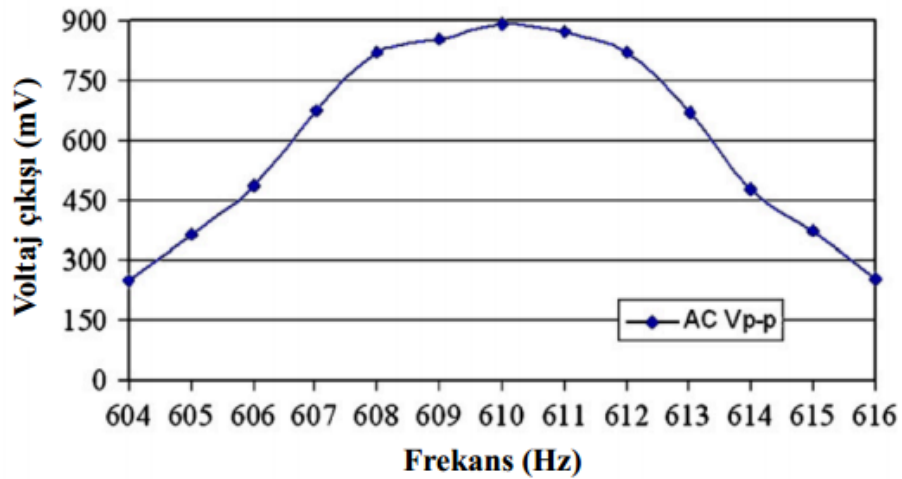
**Çizelge 2.2.** Çeşitli titreşim kaynakları için titreşim ivmesinin genliği ve temel titreşim modunun frekansı (Roundy, vd., 2003).

<b>Titreşim Kaynağı</b>	<b><math>A(m/s^2)</math></b>	<b><math>f</math></b>
Çamaşır Kurutucu	3,5	121
Otomobil motor bölmesi	12	200
Mikser haznesi	6,4	121
3 eksenli işleme tezgâh tabanı	10	70
Ayağını yere vuran insan	3	1
Otomobil ön konsolu	3	13
Bina kapı çerçevesi	3	125
Küçük mikrodalga fırın	2,5	121
Binalarda HVAC menfezleri	0,2-1,5	60
Bilgisayar CD sürücüsü	0,6	75
Caddeye bakan pencere	0,7	100

Ucunda belirli bir kütle bulunan ve PZT bimorfun Pt/Ti elektrotlar arasında bulunduğu mekanizma kullanılmış. Bu mekanizmanın bağlı bulunduğu cihaz, çevresindeki titreşimlerin etkisiyle hareketlendiğinde, elektrik enerjisi elde edilmesi hedeflenmiştir (Bkz. Şekil 2.4.). Burada hareketin genliği arttıkça elde edilen elektrik enerjisi de artar. Oluşacak en büyük genliklerin tınlaşım frekansında oluşan titreşimlerin genlikleri olduğu bilindiğinden, enerji hasadı ünitesinin doğal frekansının bulunduğu çevredeki titreşimlerin frekansı ile tınlaşım oluşturacak şekilde ayarlanması elde edilecek enerji miktarını da artıracaktır (Liu, vd., 2008).



Şekil 2.4. Tekil bir ankastre kirişin şematik yapısı.



Şekil 2.5. Şekil 2.4.'te gösterilen sistemin, tahrik frekansına karşılık çıkış voltajı.

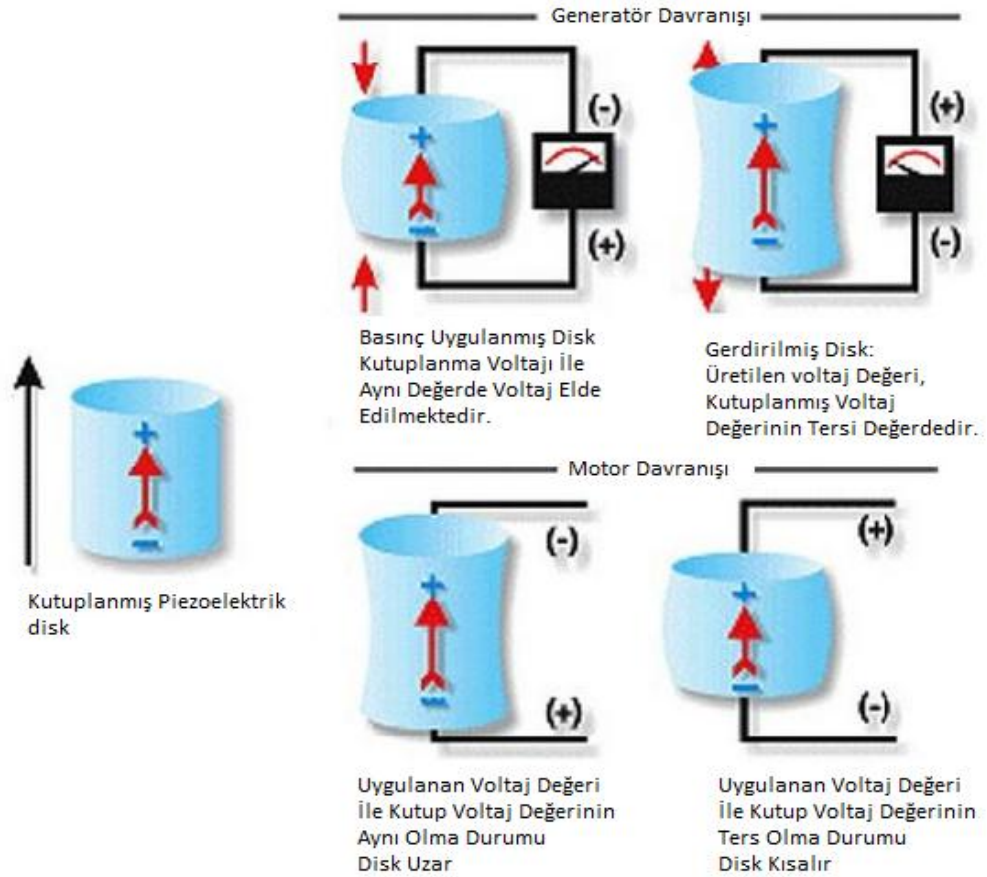
Çevredeki titreşimlerin frekansı ile enerji hasadı sistemin doğal frekansının tınlaşım oluşturabilecek şekilde ayarlanabilmesi için iki seçenek önerilmiştir. Buna göre, ya sistemin çalıştırılacağı ortamın titreşim karakteristiklerinin önceden belirlenmesi ve sistemin ona göre inşa edilmesi ya da tek bir frekansta değil belirli bir frekans aralığında çalışmaya uygun tek bir cihazın tasarlanması gerekmektedir. Her ne kadar iyi tasarlama yapılsa da titreşim tabanlı piezoelektrik malzemelerin atomik yapısı nedeniyle sistemin verimli çalışabileceği frekans aralığı yine de oldukça dardır. Bu aralık birçok sistemde 2-3 Hz olarak tespit edilmiştir (Roundy, vd., 2005).

$$P = \frac{V^2}{2R} = \frac{1}{2R} \times \frac{\left(\frac{2k_{33}tc}{k_2}\right)^2 C_p A_{in}^2}{\left[\frac{\omega_n^2}{\omega RC_b} - \omega\left(\frac{1}{RC_b} + 2\zeta\omega_n\right)\right]^2 + \left[\omega_n^2(1+k_{31}^2) + \frac{2\zeta\omega_n}{RC_b} - \omega^2\right]^2} \quad (2.1)$$

Eşitlik (2.1)'deki formülle elde edilen sonuçlara göre sistemin verimli şekilde çalıştığı aralık oldukça dar kalmıştır. Bu aralık Şekil 2.3.'de görülen MEMS çubuk yapısı için 8 Hz olarak hesaplanmıştır (Liu, vd., 2008).

### 2.3. Piezoelektrik Seramikler

Piezoelektrik özellik, malzemeye uygulanan basma kuvvetine karşılık malzemenin kutuplaşmasının değişmesidir. Aynı şekilde malzeme elektrik alan etkisinde kaldığında gerilme oluşur. İlk etki piezoelektrik etki, ikincisi ise ters piezoelektrik etki olarak adlandırılır. Bu durum piezoelektrik malzemenin elektrik alanına maruz kalmasında motor olarak çalışmasına, tersi durumda mekanik etki altında generatör olarak çalışmasına neden olur. Şekil. 2.6.'da piezoelektrik malzemenin motor ve generatör olarak çalışması görülmektedir.



Şekil 2.6. Piezoelektrik malzemenin generatör ve motor davranışı.

Piezoelektrik malzemelerde görülen elektromekanik etkiler için temel eşitlikler;

Direkt piezoelektrik etki için eşitlik;

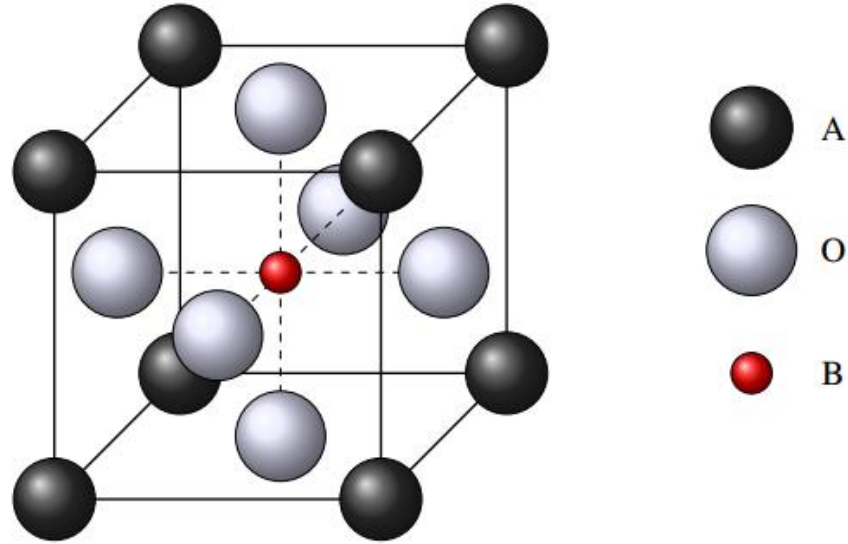
$$D = dE + \varepsilon^T E \text{ (generatör)} \quad (2.2)$$

Ters piezoelektrik etki için eşitlik;

$$S = s^E T + dE \text{ (motor)} \quad (2.3)$$

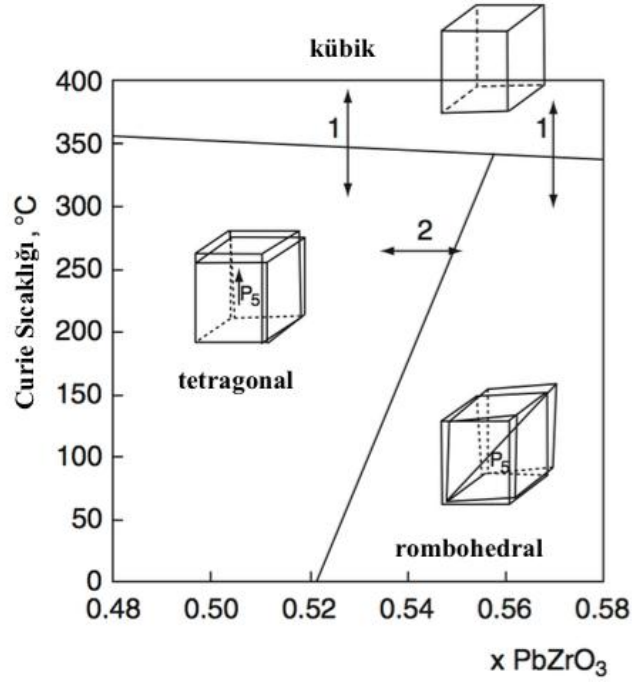
- $D$  → Polarizasyon.
- $d$  → Piezoelektrik yük sabitesi.
- $E$  → Elektrik alanı.
- $\varepsilon^T$  → Malzemenin sabit gerilme altında dielektrik sabiti.
- $T$  → Gerilme.
- $S$  → Gerinme.
- $s^E$  → Sabit elektrik alan altında gerinme.

En yaygın olarak kullanılan piezoelektrik seramik kompozisyonu “kurşun zirkonat titanat (PZT)” tır. Bu seramik kompozisyonları perovskit ( $ABO_3$ ) yapısındadırlar. Bu malzeme,  $PbTiO_3$  ve  $PbZrO_3$ 'ın bir katı çözeltilisidir. Bu malzemede  $Pb^{+2}$  A-yerinde,  $Zr^{4+}/Ti^{4+}$  iyonları da B-yerinde bulunmaktadırlar(Bkz. Şekil 2.7).



Şekil 2.7. Perovskit yapısı (Heartling, 1999).

Curie sıcaklığı adı verilen bir sıcaklıkta, katı çözeltili, paraelektrik kübik şekilden ferroelektrik şekle geçiş yapar. Bu ferroelektrik şekil kompozisyona bağlı olarak farklı kristal yapıda olabilir. Morfotropik faz sınırı (MPB) adı verilen bir bölgede paraelektrik kübik şekilden titanyumca zengin tetragonal şekle ya da zirkonyumca zengin rombohedral şekle faz dönüşümü gerçekleşebilmektedir (Bkz. Şekil 2.8.). Titanyumca zengin olan tetragonal şekilde 6 olası polarizasyon yönü bulunmaktayken zirkonyumca zengin rombohedral şekilde 8 olası polarizasyon yönü bulunmaktadır. MPB’de bu iki şeklin birlikte bulunması sonucu toplam 14 olası polarizasyon yönü söz konusudur ve bu da PZT’nin MPB’de neden mükemmel piezoelektrik özelliklere sahip olduğuna açıklık getirmektedir (Heartling, 1999).



**Şekil 2.8.** PZT katı çözeltisinde faz dönüşümleri (Heartling, 1999).

Piezoelektrik seramik kompozit malzemelerin özellikleri istenildiği gibi değiştirilebilmektedir. Bu durum farklı uygulamalar için büyük avantaj sağlamaktadır. Özellik değişimi malzemeye bir takım katkıların eklenip çıkarılması ile gerçekleşmektedir (Bkz. Çizelge 2.3.). Eklenen katkı maddesinin seramiğe kazandırdığı özelliklere göre PZT seramikleri iki ana gruba ayrılırlar. Bunlar sert PZT ve yumuşak PZT'dir. Sert PZT seramikler genellikle yüksek güç uygulamalarında kullanılırken, yumuşak PZT seramikler algılayıcı ve elektriksel yük üretici olarak kullanılmaktadır (Heartling, 1999).

**Çizelge 2.3.** Perovskit malzemede kullanılan katkıları.

	Küçük iyonlar: B <sup>4+</sup>		Büyük iyonlar: A <sup>2+</sup>	
	İyon	İyon yarıçapı	İyon	İyon yarıçapı
PZT	Ti <sup>4+</sup>	0,68	Pb <sup>2+</sup>	1,20
	Zr <sup>4+</sup>	0,80	Sr <sup>2+</sup>	1,13
Bağışçı	Nb <sup>5+</sup>	0,70	La <sup>3+</sup>	1,22
	Sb <sup>5+</sup>	0,62	Bi <sup>3+</sup>	0,96
	W <sup>6+</sup>	0,68	Nd <sup>3+</sup>	1,04
Alıcı	Mn <sup>2+</sup>	0,80	K <sup>+</sup>	1,33
	Fe <sup>3+</sup>	0,64	Ag <sup>+</sup>	1,26
	Al <sup>3+</sup>	0,50		

Perovskit malzemede bir piezoelektrik seramik kompozisyonuna eklenen bağışçı bir katkı (B-yeri için Nb<sup>5+</sup>, Sb<sup>5+</sup>, W<sup>6+</sup> ve A-yeri için La<sup>3+</sup>, Bi<sup>3+</sup>, Nd<sup>3+</sup>) katyon (Pb) boşlukları oluşturur ve daha yüksek piezoelektrik sabitler ve daha yüksek dielektrik sabitesi elde edilmesini sağlar. Aynı zamanda bu seramik malzemeler yüksek dielektrik kayıplara ve düşük Curie noktasına (genellikle 300°C'nin altında) sahiptirler. Aynı zamanda bu özellikler, yumuşak PZT kompozisyonlarının yüksek frekans ve yüksek güç uygulamalarında kullanılmasını engeller.

Perovskit malzemede bir piezoelektrik seramik kompozisyonuna eklenen alıcı bir katkı (B-yeri için Mn<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, Al<sup>3+</sup> ve A-yeri için K<sup>+</sup>, Ag<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>) anyon (O) boşlukları oluşturur ve bu da düşük piezoelektrik sabitler ve düşük dielektrik sabitesi karşımıza çıkar. Ancak düşük dielektrik kayıplar ve yüksek Curie noktası bu sert PZT kompozisyonlarının yüksek güç uygulamalarında kullanılmasına izin verir (Heartling,1999).

### 3. SUYA DAYALI ENERJİ SİSTEMLERİ

Su, güneşten sonra insanlığın başlangıcından beri yararlandığı en büyük kaynaklardan biridir. Antik çağlardan beri yerleşim yerleri akarsu, dere ve nehirlerin yakınlarına kurulmuştur. Tarihten günümüze insanoğlu, suyun mevcut enerjisini çeşitli enerji dönüşüm sistemleri geliştirerek kullanagelmiştir.

Suya dayalı enerji sistemleri suyun mevcut enerjisini çeşitli enerji türlerine çevirerek ya da direkt elektrik enerjisine çevirerek enerji elde etmemizi sağlamaktadır. Suyun mevcut enerjisi; kinetik enerji, potansiyel enerji ya da her iki enerjinin aynı anda var olduğu durumları içerir. Suya dayalı enerji sistemleri suyun mevcut enerji türüne göre tasarlanmaktadır ve en yüksek verimi elde etmeyi hedeflemektedir. Suya dayalı enerji sistemleri uygulama olarak çok geniş yelpazeye sahiptir. Fakat hali hazırdaki sistemlerin çok az bölümü yüksek güç üretimi yapabilmektedir. Teoride yüksek güç üretimi yapabilecek sistemler de oldukça fazla olmasına karşın, uygulama aşamasında olanları da test ve güvenilirlik kısımlarını henüz geçebilmiş değildirler. Suya dayalı enerji sistemlerinin başında hidroelektrik santraller (barajlar) gelmektedir. Hidroelektrik santraller, genel olarak su tutan barajları ifade etmektedir.

#### 3.1. Hidroelektrik Santraller

##### 3.1.1. Hidroelektrik santrallerin sınıflandırılması

Hidroelektrik santraller, düşülerine göre, ürettikleri enerjinin karakter ve değerine göre, kapasitelerine göre, yapılarına göre, üzerinde kuruldukları suyun özelliklerine olmak üzere beş kısımda incelenebilir.

##### 3.1.2. Düşülerine göre

Hidroelektrik santraller düşülerine göre; alçak düşülü santraller, orta düşülü santraller ve yüksek düşülü santraller olmak üzere üç bölümde sınıflandırılmaktadır. Alçak düşülü santraller ( $H < 15m$ ) genellikle debisi büyük, düz arazilerde akan, yatak eğimi az nehirler üzerinde kurulan ve çoğunlukla kaplan türbini kullanılan santrallerdir. Orta düşülü santraller: ( $15m < H < 50m$ ) çeşitli debilerdeki nehirler üzerinde kurulan kaplan veya francis türbini kullanılan santrallerdir. Bu santrallerin uzunca bir cebri boru sistemi yoktur. Yüksek düşülü santraller: ( $H > 50m$ ) ise genellikle engebeli veya

dağlık araziden akan nehirler veya barajlar üzerinde kurulan santrallerdir. Debiler değişken olup bir yaklaşım kanalı veya tüneli ile bir cebri borusu vardır. Francis veya pelton türbinleri ile donatılmışlardır (DSİ, Mayıs 2016).

### **3.1.3. Ürettikleri enerjinin karakter ve değerine göre**

Santraller ürettikleri enerjinin karakter ve değerine göre, baz santraller ve pik santraller olmak üzere gruplandırılabilirler. Baz santraller devamlı olarak enerji üreten santrallerdir. Pik Santraller ise, enerjinin en çok ihtiyaç duyulduğu sürelerde devreye giren santrallerdir.

### **3.1.4. Üretim kapasitelerine göre**

Kapasitelerine göre hidroelektrik santraller dört ana başlıkta sınıflandırılabilir. Kapasitesi 99 kW 'a kadar olan santraller küçük kapasiteli, 100 kW - 999 kW arası olan santraller düşük kapasiteli, 1000 kW - 9999 kW arası olan santraller orta kapasiteli ve 10000 kW ve daha fazla olan santraller yüksek kapasiteli hidroelektrik santraller sınıfına girmektedir.

### **3.1.5. Yapılarına göre**

Hidroelektrik santraller yapılarına göre; yer altı santrali (Hasan Uğurlu HES, Oymapınar HES), yarı gömülü veya batık santraller (Keban ve Yahşihan HES) ve yer üstü santralleri olarak ayrılmaktadır. Topografik, jeolojik, ekonomik veya emniyet nedenleri ile santrali yeraltında yapmak gerekebilir. Santral dar veya kayalık bir vadide yapılacaksa ve açıkta yer yoksa santralin yarısı yeraltında, yarısı açıkta yapılabilir.

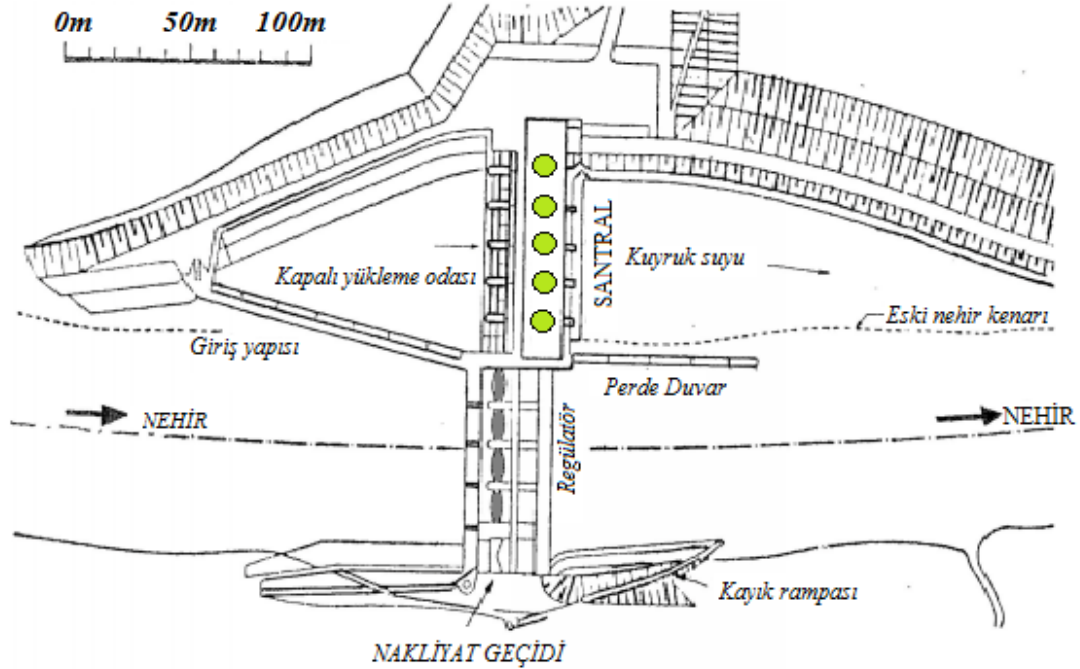
### **3.1.6. Üzerinde kuruldukları suyun özelliklerine göre**

Üzerinde kuruldukları suyun gücüne göre hidroelektrik santraller, nehir tipi santraller, kanal tipi santraller, baraj tipi santraller ve pompaj rezervuarlı santraller olmak üzere dört ana grupta toplanabilir.

#### **3.1.6.1. Nehir santraller**

Nehir tabanı yeterince geniş ise bütün yapı bu genişliğe yerleştirilir, değilse o kesit kazılarak genişletilir ve bütün tesisler aynı en kesit üzerine yerleştirilir. Nehir santral yapıları; düzenleyici ve ilgili yapılar (nehir nakil araçları geçiş yeri, tomruk yolu,

balık geçiş yeri), ızgara, perde ve benzeri duvar, servis köprüsü, dalgıç perde, giriş yapısı ve bölme ayakları, santral binası, kuyruk suyu kanalı, istinat duvarlarından ibarettir (Yıldız, 1992).



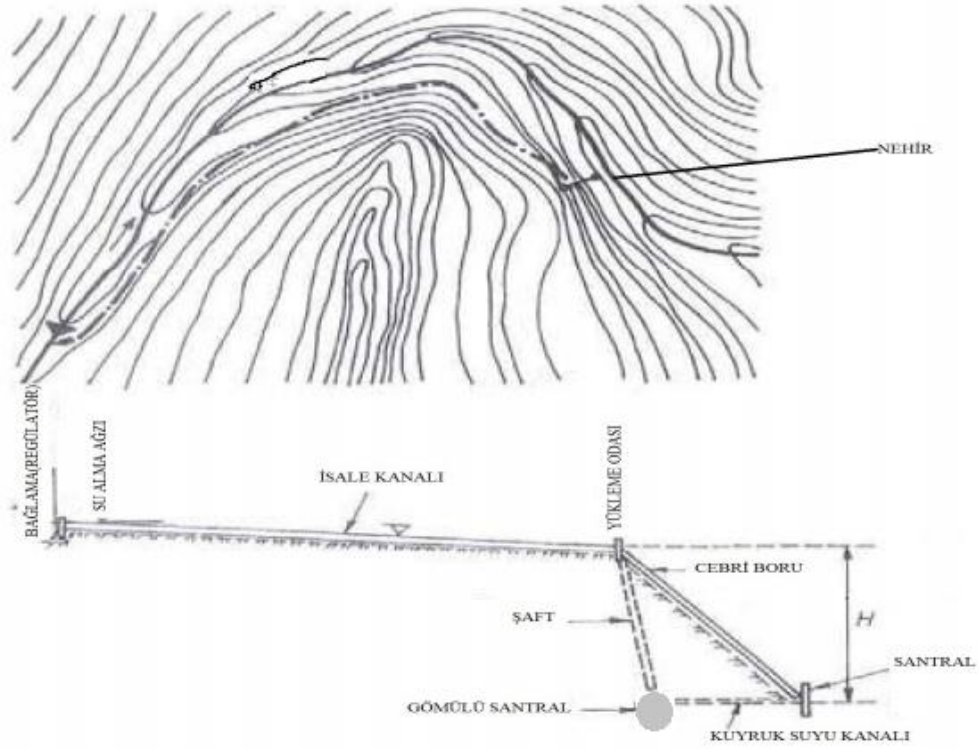
Şekil 3.1. Nehir santrali şeması (Yıldız, 1992).

### 3.1.6.2. Kanal santraller

Bu tip santralleri yapabilmek için su, bir çevirme yapısı ile bir kanala (veya tünele) çevrilerek santraller ve ilgili yapılar bu kanalın üzerine yapılabilir. Ya da bu kanal düşü kazanmak için epeyce uzatılarak topografyanın ve jeolojinin en uygun olduğu bir yerden cebri boru ile santrale bağlanır. Bu tip santraller şu kısımlardan oluşur:

- Regülatör
- Su alma yapısı ve çökeltim havuzu
- İsale kanalı
- Yükleme odası
- Basınçlı boru
- Santral binası
- Kuyruk suyu kanalı

Regülatör ile su seviyesi yükseltilerek, su ızgaralardan geçerek su alma ağız ile çökeltim havuzlarından alınır. Buradan isale kanal veya galerisiyle düşüm yapılacak yere iletilen su yükleme odasından basınçlı boruyla türbinlere düşürülür (Yıldız, 1992).



Şekil 3.2. İsale kanalı santraller (Mosonyi, 1991).

### 3.1.6.3. Baraj santraller

Tipik bir baraj santraline ait yapılar;

- Su alma yapısı
- Kuvvet tüneli
- Denge bacası
- Vana odası
- Cebri borular
- Santral binası
- Çıkış suyu kanalı
- Salt sahası ve iletim hatları

#### **3.1.6.4. Pompaj rezervuarlı santraller**

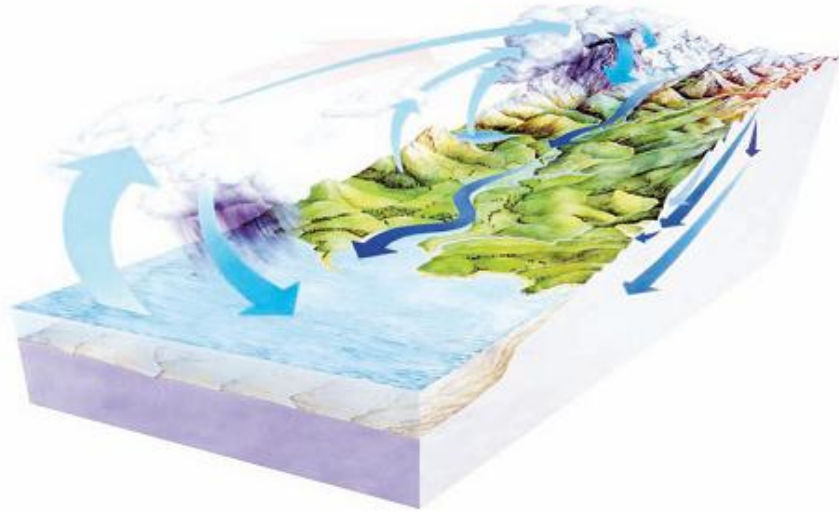
Bu santraller, enerjiye ihtiyaç azaldığı saatlerde şebekeden aldıkları enerji ile rezervuara su pompalarlar. Günün enerjiye en çok ihtiyaç olduğu saatlerde (pik saatlerde) birikmiş suyu türbinlere göndererek enerji üretirler. Türkiye’de hidroelektrik üretimin % 95,7’si barajlı santrallerden % 4,3’ü doğal göl ve akarsu santrallerinden sağlanmıştır. Türkiye’nin toplam elektrik üretimi içerisinde barajlı santrallerin katkısı % 36,5, doğal göl ve akarsu santrallerinin katkısı % 1,7’dir. Türkiye’de barajlı santraller pik yük dışında baz yük karşılamak için kullanılmaktadırlar (Bulu, 2011).

Türkiye’de hidroelektrik üretimin % 95,7’si barajlı santrallerden % 4,3’ü doğal göl ve akarsu santrallerinden sağlanmıştır. Türkiye’nin toplam elektrik üretimi içerisinde barajlı santrallerin katkısı % 36,5, doğal göl ve akarsu santrallerinin katkısı % 1,7’dir. Türkiye’de barajlı santraller pik yük dışında normal yükü karşılamak için kullanılmaktadırlar.

### **3.2. Küçük Hidroelektrik Santraller**

Birçok ülke mevcut enerji kaynaklarını daha temiz ve daha verimli kullanmaya ve yenilenebilir enerji kaynaklarından daha fazla yararlanmaya çalışmaktadır. Ülkemiz yenilenebilir enerji kaynağı olan hidrolik enerji bakımından oldukça zengindir.

Enerji kaynaklarının büyük bir kısmı güneş ışınımının maddeler üzerindeki fiziksel ve kimyasal etkisiyle oluşur. Hidrolik enerji güneş ışınımından dolayı olarak oluşan bir enerji kaynağıdır. Deniz, göl veya nehirlerdeki sular güneş enerjisiyle buharlaşmakta, oluşan su buharı rüzgârın etkisiyle sürüklenerek dağların yamaçlarında yağmur veya kar halinde yeryüzüne ulaşmakta ve nehirleri beslemektedir(Bkz. Şekil 3.3.). Böylelikle hidrolik enerji, kendini sürekli yenileyen bir enerji kaynağı olmaktadır. Hidrolik enerjiyi elektrik enerjisine çeviren sistemlere hidroelektrik santraller denir. Hidrolik enerji, M.Ö. 3000–2000 yıllarından bu yana Mezopotamya ve Çin’de, Mısır ve Anadolu’da suyun potansiyel ve kinetik enerjisinden faydalanmak için kullanılmıştır. Hidroelektrik güç sistemlerini çeşitli şekillerde sınıflandırmak mümkündür. Avrupa Birliği ülkelerinde güce göre yapılan sınıflandırmada tam bir görüş ayrılığı olmamakla birlikte küçük ölçekli hidroelektrik santrallerde kabul edilen üst sınır 10 MW ile 50 MW arasında değişmektedir (Olgun, 2009).



**Şekil 3.3.** Hidrolik çevrim (Olgun, 2009).

### 3.2.1. Büyük ölçekli hidroelektrik sistemler

Büyük ölçekli hidroelektrik sistemlerinin gücü 50 MW ve üzeridir. 50 MW güç, her biri 100W olan 500.000 ampulün harcadığı enerjiyi karşılar. Başka bir deyişle bir ev için gereken elektriksel güç 5 kW olarak kabul edilirse 10.000 evin enerji gereksinimi karşılanabilir. Bir evde ortalama 5 kişinin yaşadığı kabul edilirse 50.000 nüfuslu bir kasabanın elektrik ihtiyacını karşılamaya yetecek bir güçtür. Büyük ölçekli hidroelektrik santraller kömür ve doğalgaza dayalı termik santraller gibi konvansiyonel güç santralleri sınıfında değerlendirilir. Üretilen elektrik enerjisi diğer santrallerden üretilen elektrik enerjisiyle birlikte merkezi enerji nakil hatları ile ülkenin birçok bölgesine dağıtılır.

### 3.2.2. Küçük ölçekli hidroelektrik sistemler

Küçük ölçekli hidroelektrik sistemlerinin gücü 10-50 MW arasında kabul edilmektedir. Enerji nakil hatları ile ulusal enerji şebekesine bağlanılabildiği gibi yerel olarak bir kasabanın, bir yerleşim bölgesinin veya büyük bir fabrikanın enerji ihtiyacını karşılamak için de kullanılabilir. 10 MW'lık bir güç 10.000 nüfuslu 2.000 evin enerji ihtiyacını karşılamak için yeterlidir. Ülkemiz küçük hidroelektrik potansiyel bakımından oldukça zengindir.

### 3.2.3. Mini ölçekli hidroelektrik sistemler

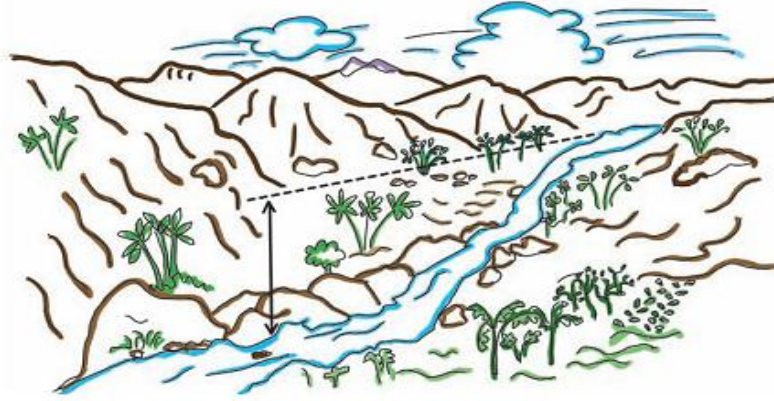
Bu sistemler ulusal enerji şebekesine daha az katkıda bulunurlar. Genellikle balık çiftliklerinin, akarsu kenarlarındaki küçük yerleşim bölgelerinin elektrik ihtiyacını karşılamak üzere 100 kW ile 10.000 kW arasında güç üretir ve yerel olarak tasarlanırlar. 100 kW'lık bir güç ile toplamda 100 kişinin yaşadığı 20 evin enerji ihtiyacını karşılamak mümkündür.

### 3.2.4. Mikro ölçekli hidroelektrik sistemler

Mikro hidroelektrik sistemler çok daha küçük ölçekte inşa edilirler ve ulusal enerji şebekesine bağlanmazlar. Ana yerleşim bölgelerinden uzaktaki alanlarda ve ulusal enerji şebekesinin ulaşmadığı bölgelerde kullanılırlar. Güçleri, genellikle çok küçük bir yerleşim yeri veya çiftlik için yeterlidir. Güç üretimi, 200 W'tan başlayarak bir grup evin veya çiftliğin yeterli aydınlanma, pişirme ve ısınma enerjisini sağlayacak şekilde 100 kW'a kadar çıkabilir. Küçük fabrikaların veya balık çiftliklerinin enerji ihtiyacını karşılayacak şekilde ve ulusal enerji sisteminin bir parçası olmaksızın çalışabilirler. Mikro ölçekli hidroelektrik sistemler, yalnızca yaz aylarında yüksek yayla ve mezzaların enerji ihtiyaçlarını karşılamak için de kullanılabilir. Örneğin Karadeniz bölgesinin yüksek yaylaları bu türbinlerin kurulup işletilmesi için çok uygundur. Yaylalar genellikle küçük debi, yüksek düşüye sahip akarsuların yakınında, yani suyun bol olduğu yerlerde kurulmuştur. Bu yörelerde elektriğe sadece bahar ve yaz aylarında ihtiyaç duyulmaktadır. Merkezi sistemlerle buralara elektrik getirmek hem çok pahalı hem de çok zordur. Çetin kış koşullarının yaşandığı bu bölgelerdeki aşırı yağışlar ve fırtınalar, enerji nakil hatlarına büyük zarar verebilmektedir. Bu nedenle günümüzde hâlâ birçok yayla ve mezzarda elektrik bulunmamaktadır. Yerel olarak ve kolaylıkla yapılabilecek mikro su türbinleri, bahar ve yaz aylarında gereken elektrik enerjisi için kullanılabilir. Yayladan dönüşün başladığı sonbahar aylarında ise sökülerek kapalı bir alanda saklanabilir. Böylece zorlu kış şartlarının etkisinden korunmuş olurlar. Mikro hidroelektrik sistemlerde sadece elektrik üretimi yapılmayabilir. Değirmen sistemlerinde olduğu gibi mekanik enerjisinden yararlanılarak un öğütme vb. gibi birçok uygulama için de kullanılabilirler. Her iki kullanımda da sistem özellikleri aynıdır.

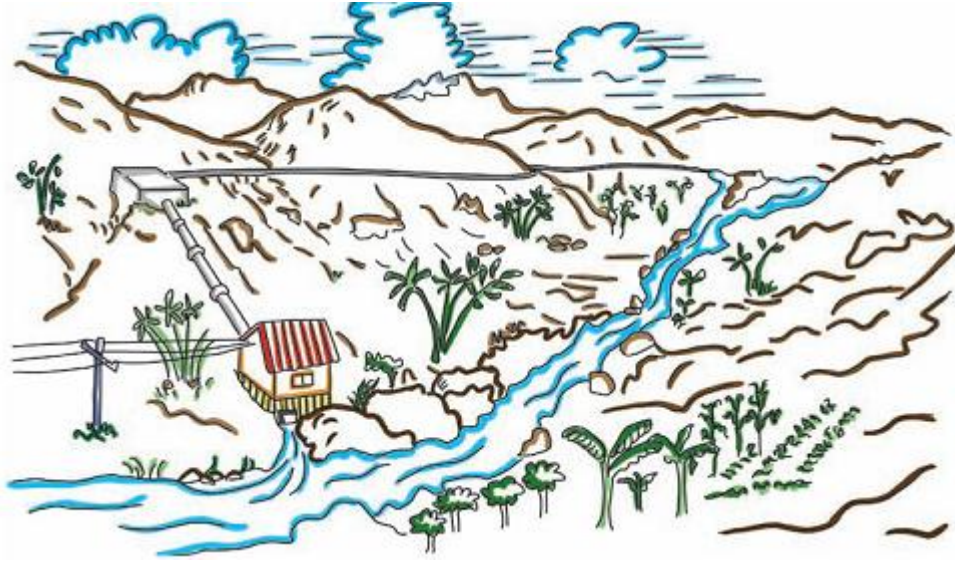
Düşüye göre yapılan sınıflandırmada

- 2-20 m alçak düşülü,
- 20-150 m orta düşülü
- 150 m ve yukarısı yüksek düşülü olarak kabul edilir.



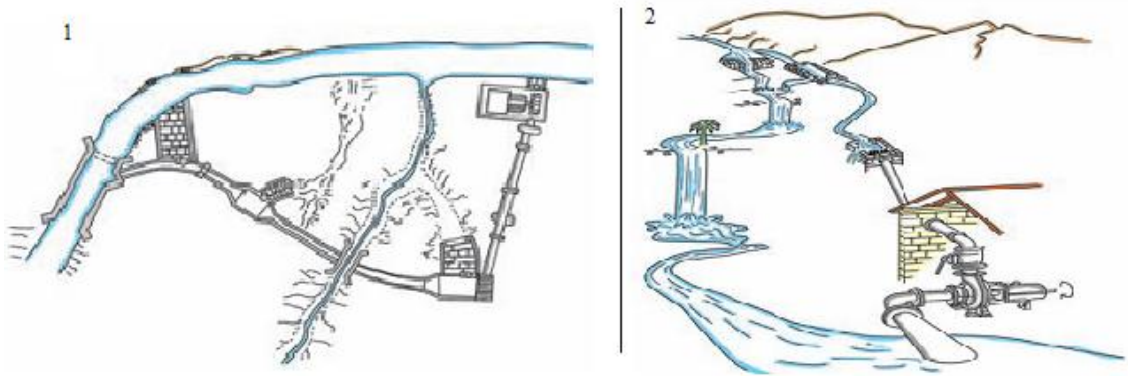
**Şekil 3.4.** Hidroelektrik santrallerde düşü kavramı (Olgun, 2009).

Genellikle düşük maliyet nedeniyle orta ve yüksek düşülü sistemlerin yapılması tercih edilir. Ülkemiz hem büyük hem de küçük debili akarsular bakımından zengin bir ülkedir. Fakat küçük debili akarsuların hidrolik potansiyelinden elektrik üretimi yeterli miktarda değildir. Son yıllarda çıkarılan yeni yasa ve yönetmenliklerle küçük hidroelektrik santrallerin kurulumu ve işletilmesi önündeki engeller aşılmış, birçok yeni proje hazırlanmıştır. Bu kapsamda 500 kW güce kadar santral kurma ve işletme serbestliği getirilmiştir. Küçük, mini ve mikro ölçekli hidroelektrik santrallerin avantajları; merkezi enerji nakil sisteminden bağımsız olarak da çalışabilmeleri, ilk kurulum maliyetlerinin düşük, işletme ve bakım masraflarının az olması, çevre kirliliğine neden olmamaları, uzun ömürlü olmaları ve yerel kaynaklarla yapılabilmeleridir. Bu tür hidroelektrik santrallerde su, bir basınçlı boru veya kanal yardımıyla yüksek bir yerden alınarak türbine verilir. Türbinlere bağlı generatörlerin dönmesiyle de elektrik enerjisi elde edilir. Üretilen elektrik enerjisi doğrudan kullanıma sunulabilmenin yanında akü sistemlerinde depolanabilmektedir. Türbinden çıkan su tekrar akarsu yatağına verilir (Olgun, 2009).



**Şekil 3.5.** Düşü farkı ile çalışan mikro santral (Olgun, 2009).

Türbinden elde edilen güç, suyun düşü (üst ve alt kodlar arasındaki düşey mesafe) ve debisine (türbinlere birim zamanda verilen su miktarı) bağlıdır. Düşü ve debinin artması sudan alınacak gücün artmasını sağlar. Küçük hidroelektrik sistemler depolamalı ya da depolamasız olarak yapılmaktadır. Depolamasız sistemde bir saptırma savağı ve su alma ağzından kanala verilen su bir yükleme odasına kadar getirilir. Yükleme odasındaki fazla su için bir taşkın savağı bulunur. Su basınçlı borudan geçirilerek türbine verilir ve burada hidrolik enerji mekanik enerjiye çevrilir. Depolamalı sistemde ise suyun önü bir baraj sistemiyle kapatılır. Bu sistemin avantajı yağışlı mevsimde suyun barajda tutulmasıdır. Böylece yağışsız ve kuru mevsimde de gerekli potansiyel enerji sağlanmış olur. Depolamasız sistemde suyun önü kesilmez, sadece bir kısmı bir kanal içerisine alınır. Küçük hidroelektrik santraller genellikle depolamasız sistemlerdir. Bu sistemlerin en büyük dezavantajı kurak mevsimde türbin için gerekli debiyi verememeleridir. En büyük avantajıysa yerel olanaklar ve çok düşük bir maliyetle yapılabilmeleridir. Ayrıca akarsu yatağına en az zarar veren sistemlerdir. Yükleme odasında günlük ayarlamalarla su debisi kontrol edilir. Depolamalı sistemler daha karmaşık ve pahalıdır. Zaman içerisinde çeşitli problemlerle karşılaşılır. Örneğin baraj gölü belirli bir sürenin ardından kum ve kille dolmaktadır. Böyle bir durumda boşaltılması hem pahalı hem de çok zordur. Baraj bir süre sonra ömrünü tamamlar.



**Şekil 3.6.** Depolamasız (1) ve depolamalı (2) Mikro hidroelektrik santraller.

### 3.3. Deniz ve okyanus kaynaklı enerji sistemleri

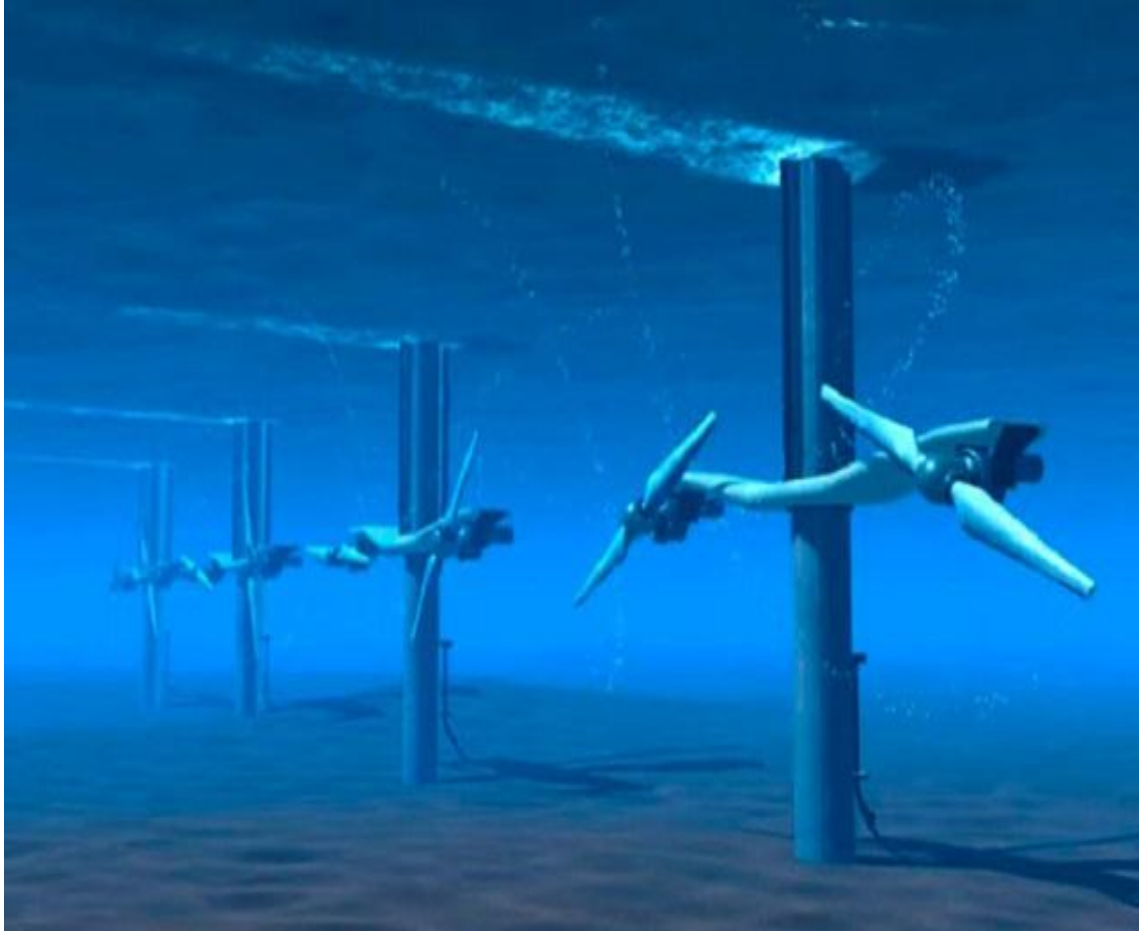
Deniz ve okyanus kaynaklı yenilenebilir enerji kaynakları arasında, gel-git, dalga, buzul, deniz akıntısı ve deniz suyu sıcaklık farkından enerji üretilmesi yer almaktadır. Bunlardan dalga ve gel-git enerjisi dünyada en çok kabul görmekte ve bulunulan coğrafi koşullara göre yararlanılmaktadır. Diğer kaynakların ise gelecek için enerji kaynağı olarak gösterilip gösterilemeyeceği üzerinde çalışmalara devam edilmektedir.

#### 3.3.1. Deniz akıntısı enerji dönüşüm sistemleri

Deniz akıntısından enerji üretme seçenekleri oldukça azdır. Bakım masrafları ve kurulum aşamalarının zorluğu bunun en büyük nedenlerindedir. Bu tür sistemler rüzgâr türbinleri ile aynı mantık üzerine inşa edilir ve çalışma prensibi de aynıdır. Kanatlı yapıya sahip türbinler, deniz akıntısının kanatlara çarpmasıyla döner ve türbine bağlı generatör enerji üretir. Her ne kadar enerji yoğunluğu fazla olsa da su altında kalması sebebiyle bakım ve kurulum maliyetleri yüksektir.

Şekil 3.7.'de bu tür sistemlerin örnek görüntüsü görülmektedir. Farklı tasarımları mevcuttur. Rüzgâr türbin çeşitleri bu tür sistemler için de geçerlidir. Kanat yapılarına göre verimlilikleri değişmektedir. Su akıntısının yoğun olması, rüzgâr türbinlerine göre yoğunluk açısından avantajdır. Fakat su debileri rüzgârlara göre daha yavaş kaldığından enerji üretimi bu oranla düşüş göstermektedir. Diğer bir avantajı ise, türbin çiftlikleri birbirlerine yakın kurulabilmektedir. Türkiye'de boğazlarda kurulabilir

fakat deniz trafiği bu tür enerji sistemlerine engel olmaktadır. Dünyada okyanus ve deniz akıntısından enerji üretimi kurulu güç olarak 450GW değerini geçmektedir.



**Şekil 3.7.** Su akıntısı türbinleri.

Bu tür enerji dönüşüm sistemlerinin en büyük avantajı enerji yoğunluğudur. Böylece kanat çapları oldukça düşmektedir. Bu tür sistemlerde kaplan ve pelton tipi türbinler sık kullanılır.

Tez uygulamasında da kullanılan dalga enerjisi dönüşüm sistemleri oldukça kapsamlı bir konudur. Bu nedenle dalga enerjisi dönüşüm sistemleri ana başlık altında incelenecektir.

#### 4. DALGA ENERJİSİ DÖNÜŞÜM SİSTEMLERİ

Kazandıkları enerjii kıyılara taşıyan dalgalar önüne ve ya deniz yüzeyine inşa edilen enerji dönüşüm sistemleriyle, dalga enerjisinin bir kısmı önce mekanik, sonra da elektrik enerjisine dönüştürülebilmektedir. Enerji üretilmesinde aktif sistemler olarak nitelendirilen sistemlerde yapının bir veya birden fazla elemanı dalga kuvvetiyle hareket eder ve mekanik enerji üretilir. Örnek olarak “Duck” ve “The Raft” verilebilir. Pasif sistemler ise çok fazla dalgaların bulunduğu sahillerde dalganın itiş tesirinin önce hidrolik yükseltiye çevrilmesi ve bir yapı arkasında kalan havuzda bulunan su seviyesinin yükselerek potansiyel enerji kazanması prensibi ile tasarlanıır, sabit olup mekanik teçhizatları yoktur. Sadece içlerindeki havanın ilerlemesi için olanak sağlarlar. Örnek olarak “OWC” ve “TAPCHAN” verilebilir (Jun, vd., 1990).

Dalga enerji düzeyinin yıl boyunca mevsimlere bağılı olarak gösterdiği değişikliklerin yanı sıra, çok kısa sayılabilecek zaman aralıklarında da görülebilen değişimler, bu sistemlerde önemli gelişmelerin oluşmasına neden olmuştur (Jun, vd., 1990).

Dalga enerjisi dönüşüm sistemlerinin tesis edileceğı yer, büyük dalga kuvvetleri ve şiddetli deniz fırtınaları göz önünde bulundurularak inşa edilmektedir. Bu nedenle, inşa edilecek bölgeye ait sadece dalga yüksekliğı değil aynı zamanda uzun dönem rüzgâr ve dalga istatistikleri yapılarak sonuçlara göre tasarım yapılmalıdır. İdeal bir dönüştürücü sistemi rastgele değişimler gösteren enerji verilerini kabul edebilen, dalga yönündeki olumsuzluklardan fazla etkilenmeyen, kısa süreli bir depolama kabiliyeti ile enerji düzeyindeki değişimleri karşılayabilen yapılarda inşa edilmelidir. Ayrıca tasarım düzeyinin çok üzerine çıkabilecek enerji girdilerine de direnç göstererek bu durumlarda dönüştürme verimini kademeli olarak azaltabilecek özelliklere sahip olmalıdır (Jun, vd., 1990).

Dalga enerjisi dönüşüm sistemleri kıyı boyunca, kıyıya yakın ve kıyıdan uzak bölgelerde uygulananlar olmak üzere 3 grupta toplanabilir. Dalga yüksekliğı ve periyodu o bölgede elde edilecek dalga enerjisinin ana parametreleridir. Dalga enerjisinin bir avantajı da, her dalga yüksekliğinden istenilen enerjinin alınabilmesidir (Clément, vd., 2002).

#### 4.1. Kıyı Şeridi Uygulamaları

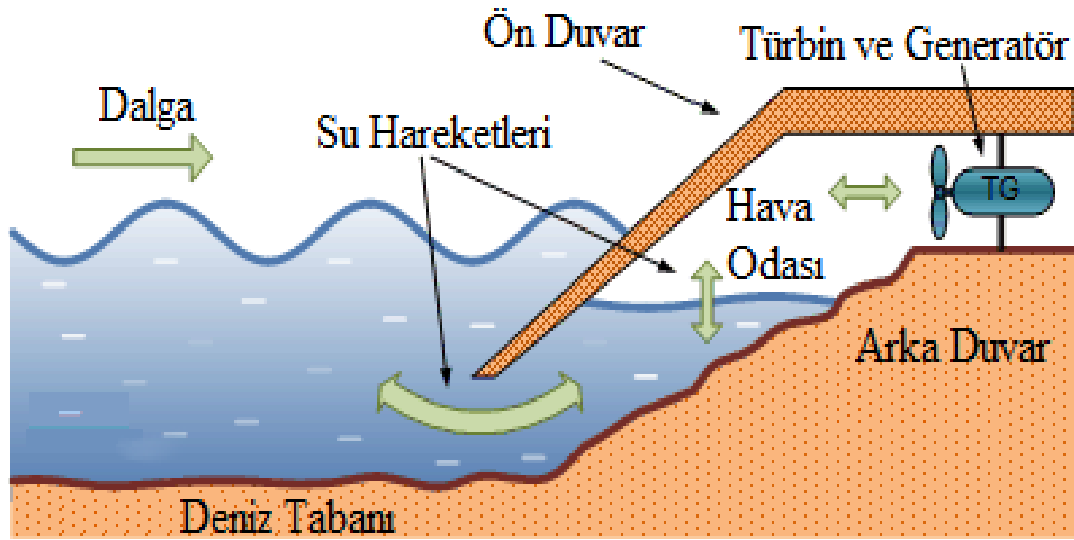
Bu tür uygulamalarda enerji dönüşüm sistemleri kıyıda sabitlenmiş veya gömülü şekilde bulunurlar. Bakım ve inşası diğer uygulamalara göre daha kolaydır. Ayrıca derin su bağlantılarına veya uzun su altı elektrik kablolarına ihtiyaç duyulmamaktadır. Buna karşılık daha az güce sahip dalga rejimi nedeniyle elde edilen dalga enerjisi daha az olabilmektedir. Bu tür uygulamaların yaygınlaşması kıyı şeridi jeolojisi, gel-git seviyesi ve kıyı yapısının korunması gibi etkenlerle sınırlanmaktadır (Clément, vd., 2002).

##### 4.1.1. Salımlı su kolonu (OWC:Oscillating Water Column)

Bu tür yapılar kısmi olarak su altındadır. Su altında denize açılan beton veya çelik çukur olarak tasarlanırlar. Sistemlerde bir su kolonu ve onun üzerinde bir hava kolonu mevcuttur. Buradaki temel prensip su seviyesi üzerinde yer alan bir kapalı hacimde havayı hapsetmeye dayanmaktadır. Sistemin altta ve üstte olmak üzere iki açıklığı bulunmaktadır. Alttaki açıklık deniz seviyesinin altında, üstteki ise deniz seviyesinin üzerinde yer almaktadır. Kapalı hacmi oluşturan kolon içindeki su seviyesi Froude Krylov Hipotezi'ne göre kolonun altındaki açıklık sayesinde ikincil derecede önem arz eden difraksiyon etkileri ihmal edildiğinde kolon dışındaki ile aynı kabul edilebilmektedir. Bunun sonucunda dışarıdaki dalga tepesi ve dalga çukurlarına bağlı olarak kolonun içerisinde de su seviyesi yükselmekte ya da alçalmakta ve kolonun su üzerindeki hacmini daraltıp genişletmektedir. Kolonun üst kısmı atmosfere açık olduğu için dalga tepesi durumunda daralan kolondaki hava sıkışıp dışarıya basılmakta iken, dalga çukurunda oluşan alçak basınç nedeniyle kolonun içine alınmaktadır. Bu sistemin üst tarafında yer alan boşluğuna bir türbin monte edilir. Havanın hareketiyle türbin dönmekte, böylece dalga enerjisi hareket enerjisine dönüştürülmektedir. Türbinin ucuna bir generatör bağlanarak türbinden elde edilen hareket enerjisi elektrik enerjisine dönüştürülebilmektedir. Konvansiyonel türbinler akışkanın belli bir yönde ilerlemesi için tasarlanmışlardır. Bunun sonucunda türbinlerin hareketli su kolonu enerji dönüşüm sisteminde kullanılmaları halinde seçime bağlı olarak ya hava emilirken, ya da basılırken enerji üretebilmektedir. Bu nedenle elde edilebilecek enerjinin yarısından fazlası kayıp olmaktadır. Sistemin üretebileceği maksimum enerjiyi elde etmek için havanın basılması ve emilmesi esnasında dönecek ve generatöre aynı yönde hareketi

iletecek türbinine ihtiyaç duyulmaktadır. Hareketli su kolonu enerji dönüşüm sistemi prototipi ikinci dünya savaşından hemen sonra Yoshio Masuda tarafından denenmiş ve alınan sonuçlar günümüzde bu sistemle çalışan birçok çalışmalara öncülük etmiştir. Masuda prototipinde hem kolona hava emilirken, hem de kolondan hava basılırken generatöre tek bir yönde hareket ileten Wells Türbini'ni kullanmıştır. Bu türbinin en önemli özelliği, her bir kanadın kanat merkezinden geçen eksene göre simetrik olmasıdır. Günümüzde Wells Türbini tek bir pervaneden oluşmamakta, iki pervaneli “duo” ve üç pervaneli “tandem” modelleri mevcuttur. Kanat boyutlarını ve sayılarını optimize edebilmek için sonlu farklar ve sonlu elemanlar gibi nümerik yöntemlere ve deneylere başvurulmaktadır (McCormick, 1981; Bak, 2003).

OWC dönüşüm sistemlerinin (Bkz. Şekil 4.1. ve Şekil 4.2.) dünya genelinde birkaç çeşidi geliştirilmiştir. Bunlarda; European Pilot Tesisi, Portekiz Azures de Pico adasında geliştirilmiştir. 400 kW'lık bu sistem test amaçlı kurulmuştur. İngiltere'de Belfast Queen's Üniversitesi tarafından 1991 tarihinde Islay adasında 75 kW'lık bir prototip olan (Şekil 4.3.) Limpet OWC kurulmuştur.



Şekil 4.1. OWC dalga enerjisi dönüşüm sistemi kesiti.



Şekil 4.2. OWC dalga enerjisi dönüşüm sistemi.

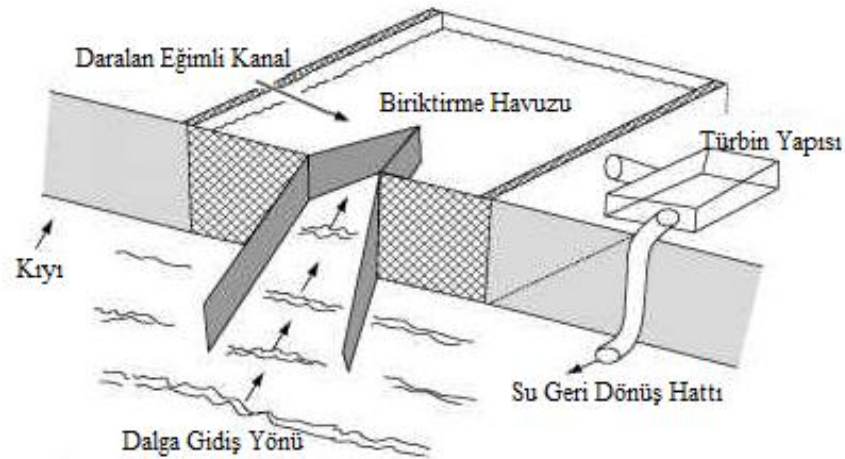


Şekil 4.3. Limpet OWC (Clément, vd., 2002).

#### 4.1.2. Daralan kanal sistemi

Bu sistem geleneksel hidroelektrik enerji üretim sistemiyle aynı prensibe dayanmaktadır. Bu sistemler su seviyesinin 3-5 m. üzerinde duvar yüksekliğine sahip, uçurumun kenarına inşa edilmiş hazneyi besleyen, gittikçe daralan bir kanaldan

oluşmaktadır (Bkz. Şekil 4.4). Kanalin daralması dalga yüksekliğinin artmasına neden olur ve yükselen dalgalar kanal duvarlarından haznenin içine boşalır. Su haznede depolandığından hareketli dalganın kinetik enerjisi potansiyel enerjiye dönüşür. Depolanan su türbine verilir. Çok az hareketli parçası olduğundan düşük bakım maliyetine ve yüksek bir güvenilirliğe sahiptir. Bu sistemde ihtiyaç duyulana kadar enerji depolanabilmektedir. Bununla beraber bütün kıyı kesimleri için uygulanabilirliği yoktur. Bu sistemde asıl enerji dönüşüm sistemlerini oluşturan türbin ve generatörün açık deniz koşullarına maruz kalmamaları en temel avantajıdır. Sistemin çalışma prensibi gereği suyun akışını hareket enerjisine dönüştürme görevini yerine getiren türbin tek yönde dönecek şekilde tasarlanır (Mc Cormick, 1981; Clément, vd., 2002).

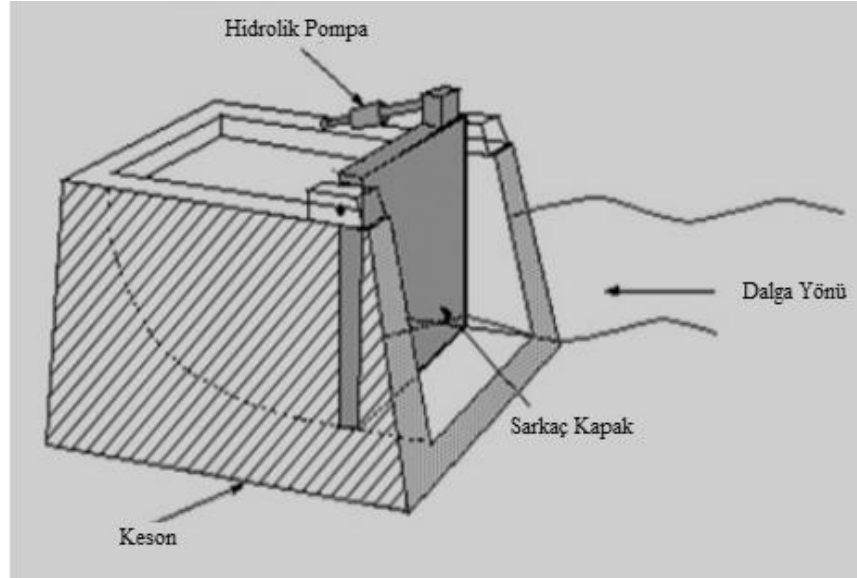


Şekil 4.4. Daralan kanal (TAPCHAN) sistemi.

#### 4.1.3. Sarkaç tipi dönüşüm sistemi (PENDULAR)

Bu sistem bir enerji dönüşüm sisteminden çok bir dalgakıran şeklinde düşünülebilir. Sistem, bir tarafı denize açılan kapalı dikdörtgen bir yapı şeklindedir. Bu açık kısma sarkaç bir kapak menteşe ile monte edilir. Gelen dalgalar bu kapağa çarparak ileri geri hareket ettirmektedir. Bu nedenle bu sistemin kapağına sarkaç denmektedir. Kapak gelen dalga karşısında içeriye doğru açılırken temel yapı içerisine suyun girmesine kısmen izin verilir. Dalga enerjisini kaybettikten sonra dalga tepesi yerini dalga çukuruna bıraktığında sarkacın ağırlığının oluşturduğu basınç yapı içindeki

suyun basıncından yüksek olmakta ve sarkaç suyu yapıdan dışarıya basmaktadır (Bkz. Şekil 4.5). Böylece bu hareket ileri-geri sürekli devam eder ve sarkacın kendisine bağlı olan bir hidrolik pompayı tahrik ederek enerji üretimi ve dalga yüksekliğinin indirgenmesi sağlanmış olur (Bak, 2003).



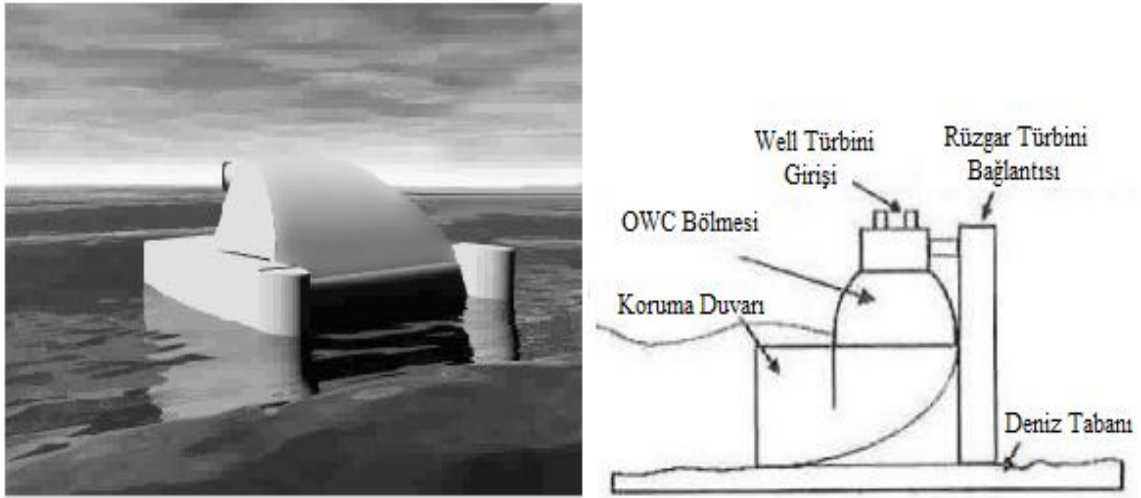
**Şekil 4.5.** Pendular sisteminin şematik gösterimi.

## 4.2. Yakın kıyı tipi uygulamalar

Bu sistemler kıyıya yakın, 15-25 m. Su derinliklerinde gerçekleştirilmektedir. Bu tür sistemlerde OWC'nin değişik tasarımları mevcuttur.

### 4.2.1. Osprey

Wavegen tarafından geliştirilen OSPREY'in gücü 1,5 MW'lık bir rüzgâr türbininin dâhil edilmesiyle 2 MW'a çıkartılmıştır. Bu sistemin ticari yapısı için üzerinde oldukça çok çalışmalar yapılmakta ve özellikle kurulum maliyetinin azaltılması maksadıyla çalışmalar devam etmektedir. İlk prototip olan OSPREY I, kurulum aşamasında çelik gövdeli sistem problem oluşmuştur. Yeni OSPREY 2000 ise kompozit malzemedan açık denizlerde kısa sürede kurulacak şekilde imal edilmiştir. 15 m. su derinliğinde ve kıyından 1 km uzaklıklara kurulacak şekilde tasarlanmıştır (Bkz. Şekil 4.6.) (Clément, vd., 2002 ; Ün, 2003).

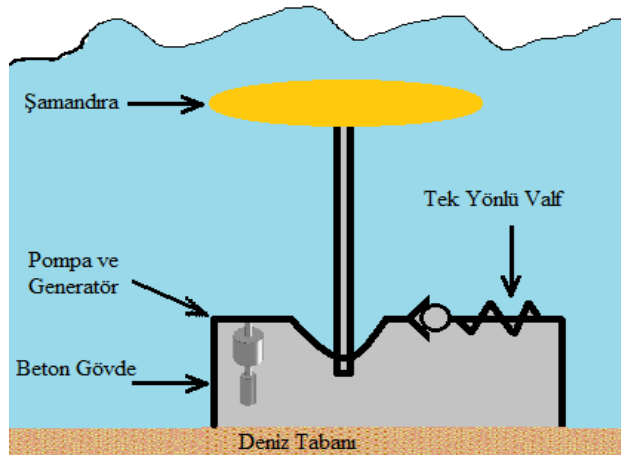


Şekil 4.6. OSPREY şeması ve görüntüsü.

#### 4.2.2. Danimarkalı dalga şamandırası enerji dönüşüm sistemi

En basit dalga pompası sistemlerinden biridir. Sistemin gövdesi deniz dibine sabitlenir ve sistemin üzerinde iki açıklık bulunur. Bu açıklıklardan biri sisteme deniz suyu girişini, diğeri ise sistemden su çıkışını sağlamaktadır. Giriş kısmına tek yönlü bir valf, sistem çıkışına bir türbin konulmaktadır. Türbin bir generatöre bağlanmakta ve sistemin içerisine giren suyun türbine basılması için gereken enerji piston hareketi ile elde edilmektedir (Bkz. Şekil 4.7.). Piston hareketi dalga tepe ya da çukuruna göre yukarıya veya aşağıya hareket eden şamandıra vasıtasıyla sağlanır (Bak, 2003).

Piston krank mili ile şamandıra koluna bağlanarak hareketi sağlanmış olur.



Şekil 4.7. Danimarkalı dalga şamandırası enerji dönüşüm sistemi.

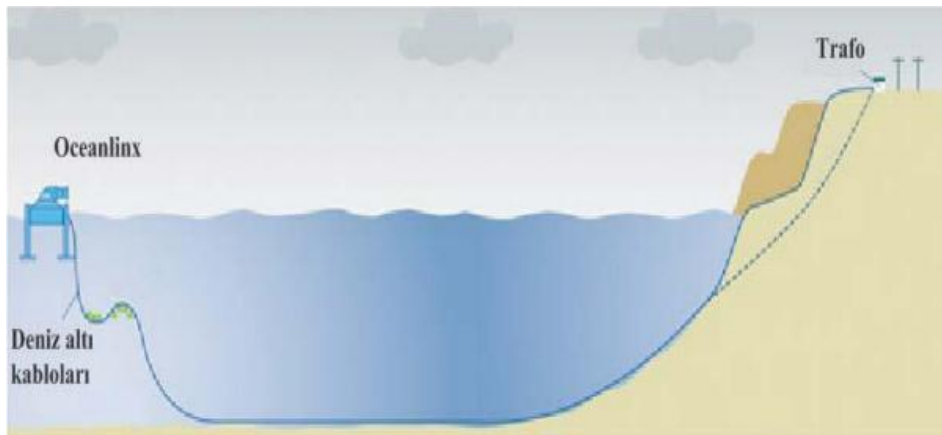
### 4.2.3. Oceanlinx

Oceanlinx, yeni nesil SSS sisteminin bir uyarlamasıdır. Sistem genel olarak SSS sistemi ile aynı karakteristikte çalışmakta ve elektrik üretimi benzer şekilde gerçekleştirilmektedir. Sistem parabolik bir duvara sahiptir ve bu duvar dalgaları sütuna odaklamaktadır (Bkz. Şekil 4.8.).

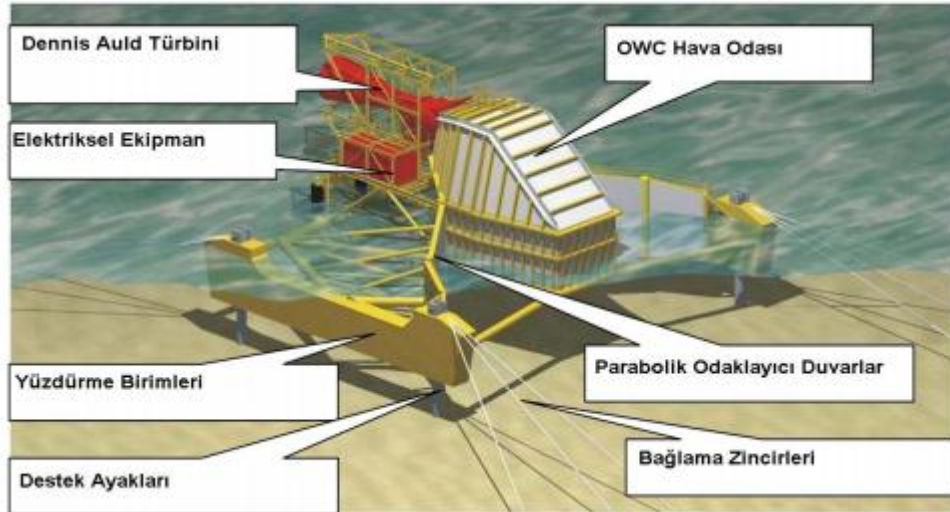


Şekil 4.8. Oceanlinx (Peswiki, 2010).

Sistemde, geleneksel SSS sisteminde kullanılan sütundan farklı olarak genişliği daralan bir sütun kullanılmıştır. Genişliği daralan sütun içerisindeki hava, daralan yapıdan dolayı, en yüksek hıza ulaşır ve türbinden geçerken maksimum düzeyde enerji üretilmesini sağlar. Oceanlinx sisteminin özü bu daralan formdaki sütuna dayanmaktadır. Üretilen elektrik enerjisi kıyıya su altı kabloları ile taşınmaktadır.



Şekil 4.9. Oceanlinx iletim hattı.

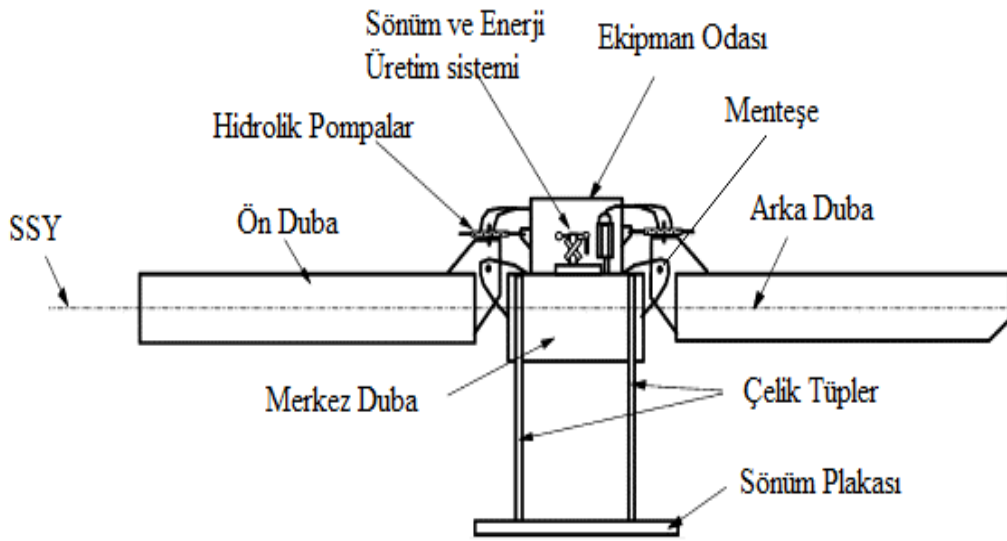


**Şekil 4.10.** ENERGETECH firmasının OWC sistemi (Hagerman ve Bedard, 2003).

40 m'den daha derin sularda yüksek dalgalar için kıydan uzak dönüşüm sistemleri kullanılmaktadır. Bu sistemlerde enerjinin iletimi için uzun elektrik kablolarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sistemler McCabe Dalga Pompası, OPT dalga enerji dönüştürücüsü, Pelamis, Archimedes Dalga Salınımı, Salter Duck, FloatingWave Power, Vessel, Mighty Whale, PS Frog, Wave Dragon, Swedish House Pump, DWP Float, Point Absorber Wave Energy Converter, SDE olarak isimlendirilebilir.

#### 4.2.4. McCabe dalga pompası

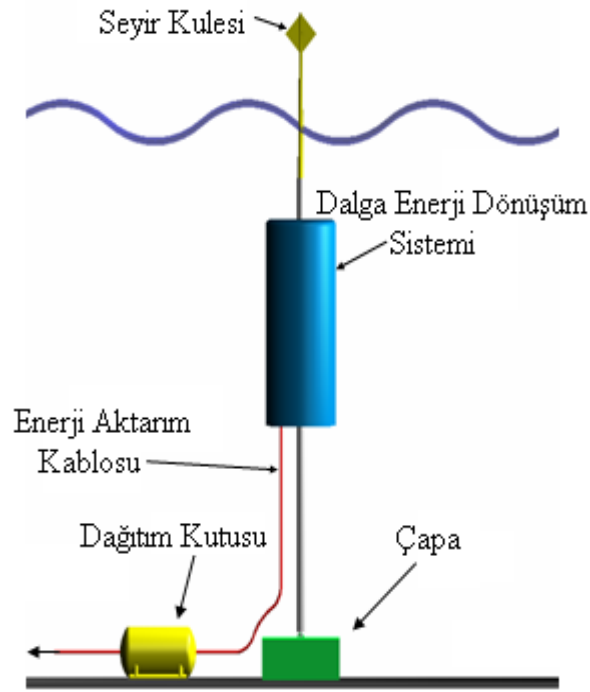
Bu sistem 1980'de teorik çalışmalar ve deneyler sonucu Peter McCabe tarafından oluşturulmuştur. Sistem birbirine menteşe ile bağlanmış, düzenli bir şekilde sıralanmış ve birbirine bağlı hareket eden üç adet dikdörtgen çelik (4m. genişliğinde) dubadan oluşmaktadır. Ekstra bir kütle eklenmesiyle merkez dubanın ataletinin artması sağlanır. Enerji ise merkez duba ile diğer dubalar arasına monte edilen hidrolik pompa vasıtasıyla menteşe noktalarındaki hareketten sağlanmaktadır (Bkz. Şekil 4.11). 40 m. uzunluğundaki bir prototip 1996 yılında Kilbaha, Country Clare ve İrlanda'da kurulmuştur. Su pompalamada, elektrik üretiminde, mekanik güç sağlayıcı olarak kullanılabilir (Clément, vd., 2002).



Şekil 4.11. McCape dalga pompası.

#### 4.2.5. OPT dalga enerji dönüşüm sistemi

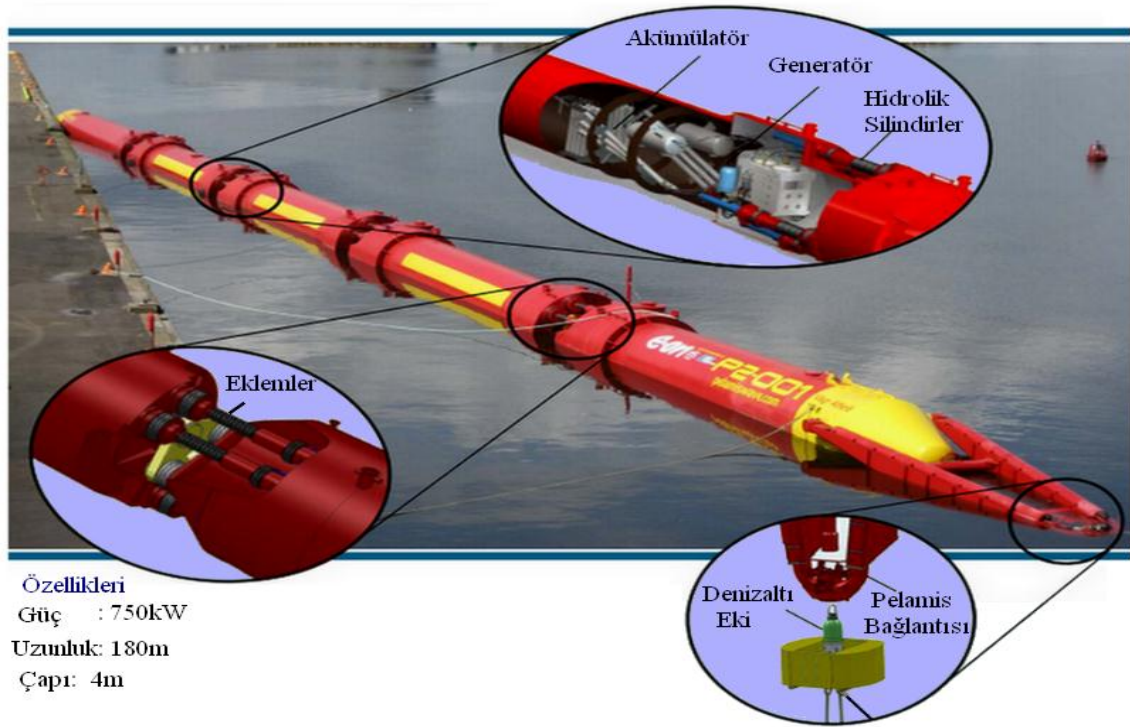
Amerika Birleşik Devletlerindeki Okyanus Güç Teknolojisi (OPT) tarafından geliştirilen Dalga Enerji Dönüştürücüsü (WEC), 2-5 m çaplı üstü kapalı tabanı denize açık silindirik bir yapıdan oluşmaktadır. Kondansatörün tepesi ile yapı içerisinde yüzen çelik yüzücü arasında hidrolik bir pompa yerleştirilmiştir. Kondansatörün hareketi çelik yüzen parçayı itmesi sonucunda hidrolik sistem yüksek basınca ulaşan yağı generatöre pompalar. Yapının yüzücüye göre hareketinden elektrik üretilir (Bkz. Şekil 4.12.). Doğu Atlantik'te test edilen modelin prototipleri Avustralya ve Pasifik'te kurulmaktadır. Sistemdeki enerji dönüştürücüleri ayrı ayrı değerlendirildiğinde 20-50 kW üretim kapasitesine sahip olup, sıralı dizim yöntemiyle kapasitenin artırımı amaçlanmıştır (Clément, vd., 2002).



Şekil 4.12. OPT enerji dönüşüm sistemi.

#### 4.2.6. Pelamis dalga enerjisi dönüşüm sistemi

Sistem şekli nedeniyle, bir deniz yılanı cinsi olan pelamise benzediği için bu isim verilmiştir. Yapı kısmi olarak su içinde yer alan menteşelerle birbirine bağlantılı silindirik şamandıralardan oluşan eklemliler bir yapıdır. Sistem deniz yüzeyine yerleştirilirken yer değiştirmesini önlemek için bazı noktalarından deniz tabanına halatlarla sabitlenir. Uzun pelamis gelen bir dalga karşısında su yüzeyinde kalacak şekilde hareket eder. Hidrolik silindirler içinde yer alan hidrolik yağı, silindirler içinde hareket ederken yine silindirler içinde yer alan ve hidrolik sıvının hareketiyle tahrik edilen bir pompayı harekete geçirir. Generatöre bağlı bu pompa generatörün çalışmasıyla elektrik üretir (Bkz. Şekil 4.13.). “Ocean Power Delivery Ltd.” şirketinin patenti olan bu sistem açık denizlerde kullanılacak şekilde tasarlanmıştır. Şirket tarafından 130 m. uzunluğunda, 3,5 m. genişliğinde 375 kW gücünde silindirler kullanmak suretiyle sistemden uygun şartlarda düzenli olarak 375 kW gücünde enerji elde edilmesi planlanmıştır.



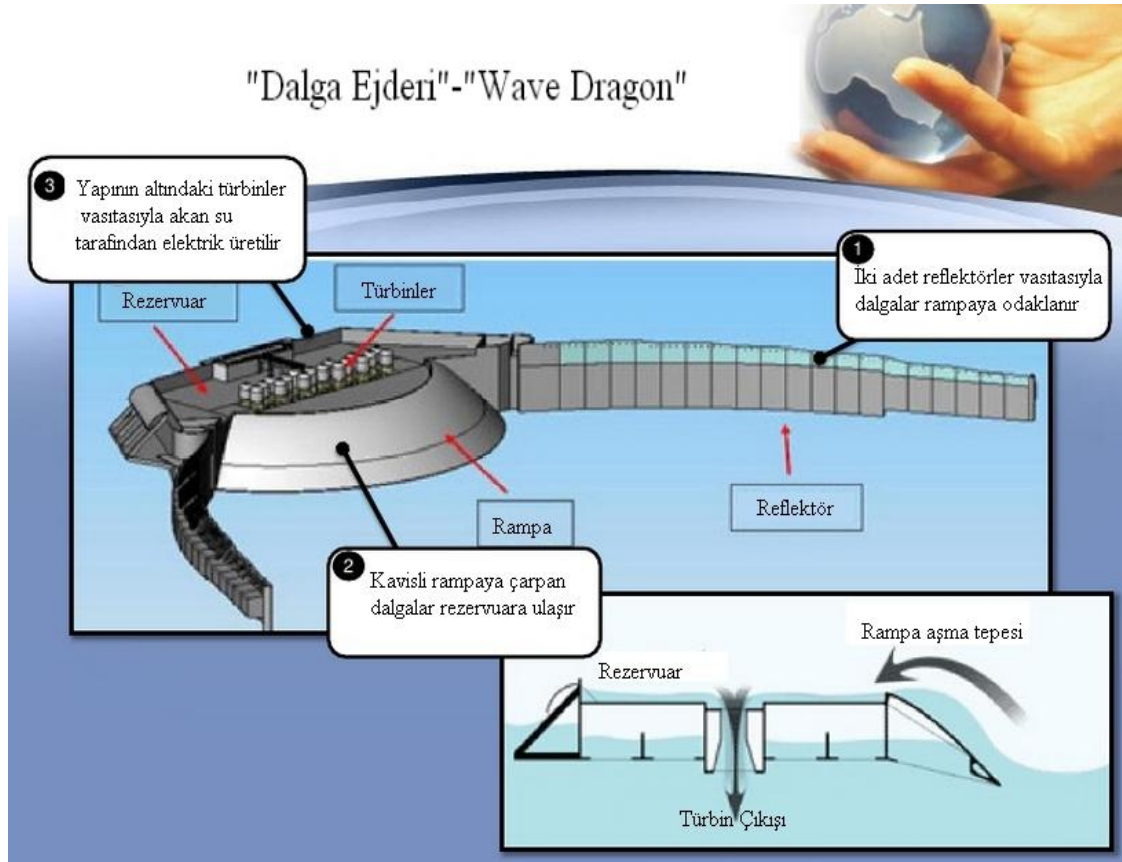
Şekil 4.13. Pelamis sistemi ve kısımları.

Silindirik yapılar gelen dalga ile salınım yaparlar ve silindir içindeki yüksek basınçlı akışkan hareket ederek sistem içinde bulunan hidrolik pompayı tahrik eder. Hidrolik pompadan alınan hareket enerjisi de bir generatör yardımıyla elektrik enerjisine çevrilir. Tüm silindir yapılardan elde edilen enerji tek bir deniz dibi kabloyla karaya transfer edilir. Pelamis, kıydan 5-10 km uzaklıkta ve yaklaşık olarak 50-70 m derinlikte, yüksek enerji taşıyan dalgalardan faydalanmak için tasarlanmıştır (Henderson, 2005).

Pelamis, sert dalgalara dayanıklı olmasının yanı sıra açık denizde sık bakım gerektirmemesi ve uzaktan kumanda edilebilmesi gibi birçok avantaja sahiptir. Pelamis'in mevcut üretim sistemi, 140 m uzunluğunda ve 3,5 m çapındadır. Cihaz başına üç adet dönüşüm modülü içermektedir. Her sistem 750 kW enerji üretebilmektedir. Pelamis enerji dönüşüm sisteminin verimi, kurulum yapılan bölgenin dalga karakteristiklerine göre değişim gösterebilmektedir. Sistem, bölgenin dalga durumuna göre yıl içerisinde ortalama %25-40'lık bir periyotta tam güçte enerji üretimi yapabilmektedir. Her yapı yaklaşık 500 evin yıllık elektrik ihtiyacını karşılayabilecek kapasitede üretim yapabilmektedir (Henderson, 2005).

#### 4.2.7. Dalga ejderi

Dalga Ejderi (wave dragon) Danimarka'da Löwenmark şirketinden Mühendis Erik Friis-Madsen tarafından icat edilip, geliştirilen ve patenti alınan su üstünde yüzen açık deniz dalga enerjisi dönüştürücüsüdür. Dalga Ejderi basit bir yapıya sahiptir. Hareketli parça olarak sadece türbinler vardır. Kıyıdan uzak bölgelerde uygulanan bir dalga enerjisi dönüşüm sistemidir. Sistem zorlu ve kötü şartlara dayanıklıdır. Dalga Ejderi diğer dönüşüm sistemlerine kıyasla daha derin sularda kullanılır. Dalgaların kıyıya varmadan önceki enerjisini kullanmak amaçlanmıştır. Bu sistem, depolanan suyun potansiyel enerjisinden verimli olarak yararlanabilmek için mümkün olduğu kadar sabit kalabilecek yapıda tasarlanmıştır. Dalga Ejderinin üzerine dalga ile gelen su, seviyesi deniz seviyesinden yüksek geçici rezervuarda depolanır. Depolanan su, türbinlerden geçerek hidroelektrik santrallerde olduğu gibi enerji üretir. Şekil 4.14.'te sistemin çalışma prensibi görülmektedir. Şekil 4.15.'te ise sistemin görüntüsü bulunmaktadır.



Şekil 4.14. Dalga ejderi (Wave Dragon) kısımları.



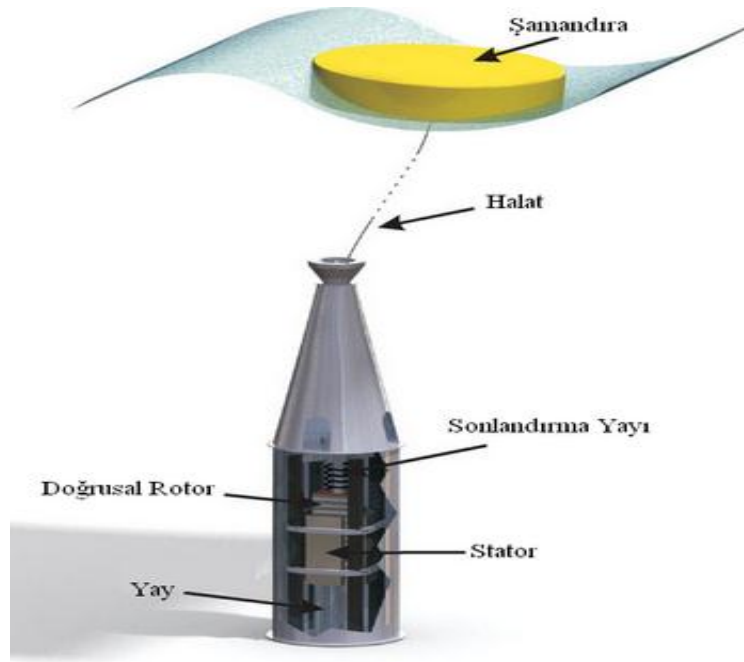
**Şekil 4.15.** Dalga ejderi (Wave Dragon) görüntüsü.

Dalga ile gelen suyun rezervuarda depolanmasını sağlamak için sistemde rampa kullanılmaktadır. Rampa işlevselliği bakımından bir kumsala benzetilebilir. Ancak daha kısa ve dalganın yapıya ulaştığında oluşan enerji kaybını önlemek için nispeten daha dik bir yapıdadır. Çünkü kıyılara ulaşan dalganın geometrisi değişir ve taşıdığı güç azalır. Rampa ise bu etkiyi, enerji dönüşümünün verimliliğini arttırmak için tasarlanmıştır (Wave Dragon, 2006).

Dalga Ejderi 1MW ile büyüklüğüne göre 11MW'a kadar enerji üretebilmektedir.

#### **4.2.8. Doğrusal generatörlü şamandıra enerji dönüşüm sistemi**

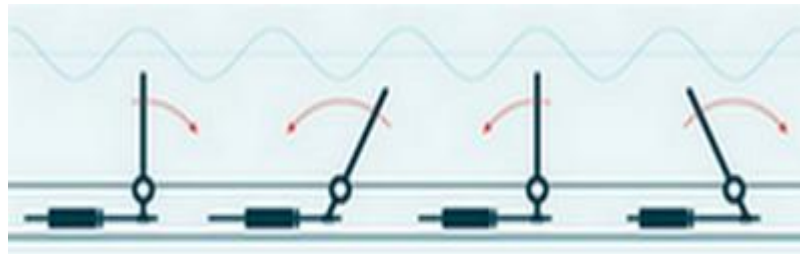
Açık denizde kullanılan şamandıra tipli enerji dönüştürücü sistemleri de bulunmaktadır. Bunlara örnek olarak dalga enerjisi ile su yüzeyinde yukarı aşağı hareket eden şamandıraların, hareketini doğrusal tipteki generatörler ile elektrik enerjisine dönüştüren sistemler gösterilebilir. Bakım ve kurulum maliyetleri az olmasının yanında enerji üretimi düşüktür. Ayrıca üretilen enerji frekansında düzenleme yapmak oldukça zordur. Bunun nedeni dalgaların stabil olmaması ve doğrusal generatör kullanılmasıdır (Bkz Şekil 4.16.).



Şekil 4.16. Doğrusal generatörlü dalga şamandırası.

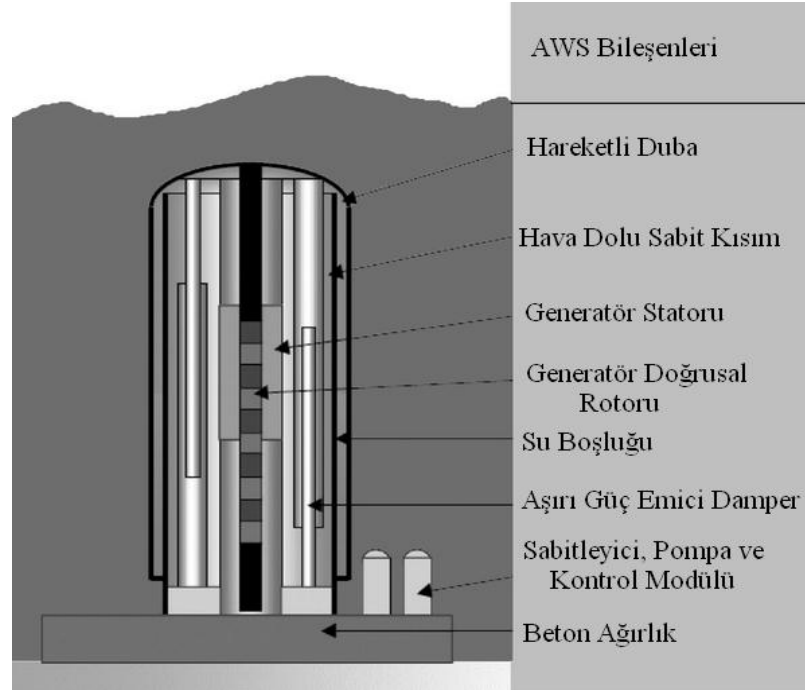
#### 4.2.9. Dalga paleti (Wave Roller) enerji dönüşüm sistemi

Bu sistem deniz dibine sabitlenmiş sarkaç hareketi yapabilen levhadan oluşmaktadır (Bkz. Şekil 4.18.). Deniz dibindeki dalga hareketinden yararlanarak enerji üretimini amaçlayan bu sistemde, dalga ile ileri-geri hareket eden levha bir piston tarafından tutulmaktadır. Sarkaç tipi enerji dönüşüm sistemi ile aynı prensipte çalışır (Bkz. Şekil 4.17.). Piston hidrolik motoru tahrik eder. Hidrolik motora bağlanan generatör ile de elektrik üretimi gerçekleştirilir (ETAP, 2007).



Şekil 4.17. Dalga paleti enerji dönüşüm sisteminin çalışma prensibi.

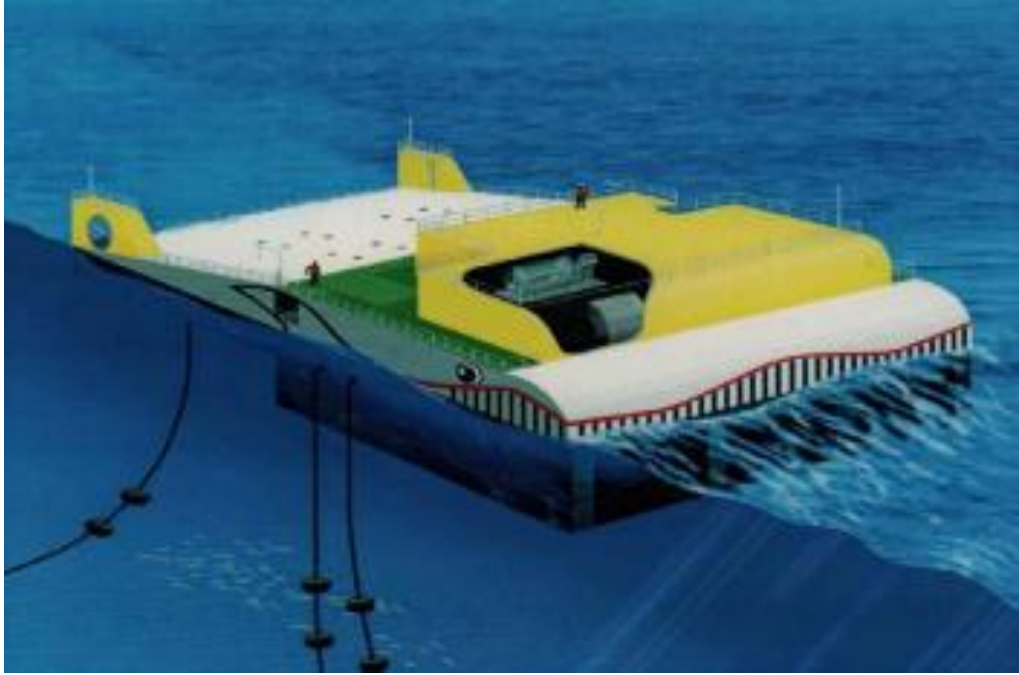




Şekil 4.19. Arşimet dalga salınımı sistemi.

#### 4.2.11. Büyük balina enerji dönüşüm sistemi (Mighty Whale)

“Japan Marine Science and Technology Center” tarafından geliştirilen aynı zamanda bir dalgakıran olarak da çalışan hibrit sistemdir. Genel görünümünden dolayı büyük bir balınayı andırıldığından sistem bu adı almaktadır. Sistem enerji dönüşüm amacının yanında, koylarda kurulmuş olan balık çiftliklerini dalgalardan korumak amacıyla da tasarlanmıştır (Bkz. Şekil 4.20.). Yüksek kısım gelen yüksek dalgaları karşılamakta ve buradan giren yüksek genlikli dalgalar hava odası içinde yükselirken bu odanın içindeki havayı sıkıştırmaktadır. Bu sırada yukarı kısımda bulunan açıklıktan kaçan hava bir türbini döndürmekte ve generatöre hareket iletisini sağlamaktadır. Diğer bir yandan gerek içeride sıkışan havanın atmosfer basıncından daha yüksek olması gerekse hava odasının duvarlarına çarpması nedeniyle enerjisinin bir kısmını kaybetmektedir. Bu sistemler gelen dalgaları yansıtmamakta, dalga enerjisinin %60’ını kullanabilmekte ve gelen dalgaların genliklerini %80 oranında azaltabilmektedir. 1998 yılından beri Nansei Town’ın 1.5 km açıklarında, 40 m derinliklerde 3 sıralı OWC’li prototip (Bkz Şekil 4.21.) 120 kW’lık kapasitesiyle çalışmakta ve sistemin dizaynı 50 fırtınalara dayanacak şekilde yapılmıştır (McCormick, 1981; Clément, vd., 2002).



Şekil 4.20. Büyük balina enerji dönüşüm sistemi (Clément vd., 2002).

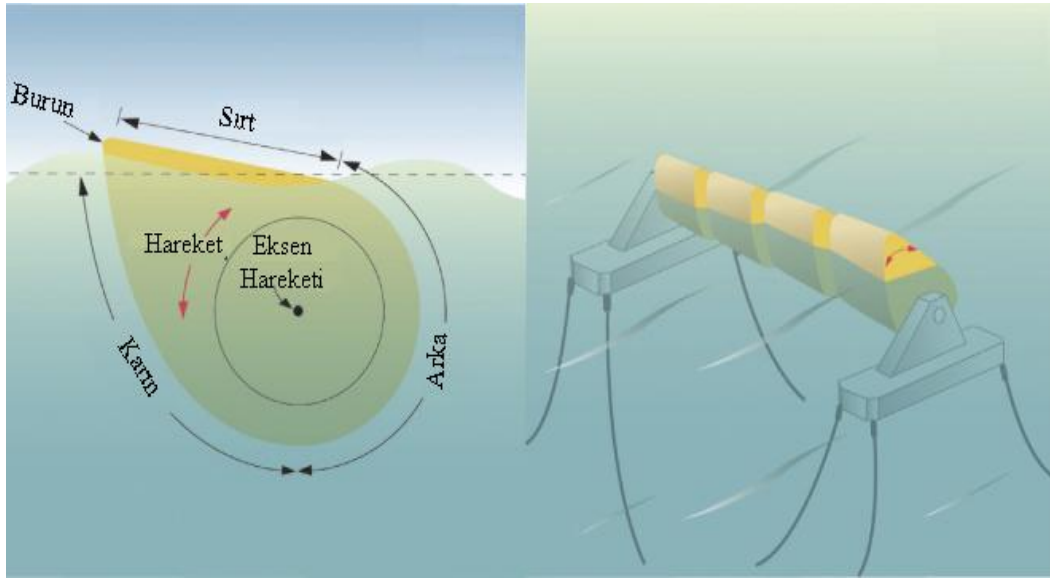


Şekil 4.21. Büyük balina enerji sisteminin şematik görünümü (Clément vd., 2002).

#### 4.2.12. Salter's duck enerji dönüşüm sistemi

Dalga enerjisinden mekanik enerji elde edilmesini sağlayan ilk metotlardan biri olan Salter Ördeği, petrol krizinin de etkisiyle, 1970'lerde Edinburgh Üniversitesi profesörlerinden Stephen Salter tarafından icat edilmiştir (Rodrigues, 2005).

Sistemin en önemli özelliği dalganın kinetik ve potansiyel enerjilerini mekanik enerjiye %90 verimle çevirebilmesidir. Sistem aynı zamanda dalgakıran özelliğine sahiptir. Sistemde dalga, suyun içinde yer alan ve yumurtaya benzeyen bir forma çarparak kendi eksenini etrafında döndürür. Bu eksenden geçen bir şaft türbini hareket ettirir ve türbine bağlanan bir generatör ile elektrik üretilir (Bkz. Şekil 4.22.). Aynı şafta birden fazla duck sistemi bağlanabilir. Enerjisinin bir kısmı ile duck'ı döndüren dalga eski şiddetinden önemli bir kısmı kullanılmış ve genliği azalmıştır. (McCormick, 1981; Clément, vd., 2002; Bak, 2003).



Şekil 4.22. Salter duck enerji dönüşüm sistemi.

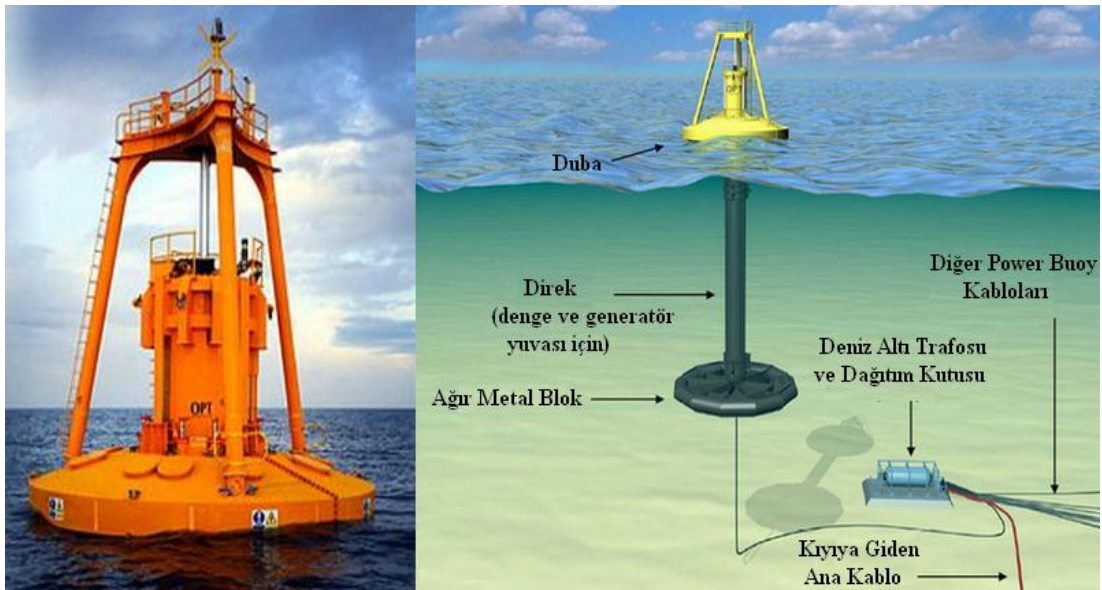


Şekil 4.23. Salter duck görünümü.

#### 4.2.13. Modüler şamandıra (power buoy) enerji dönüşüm sistemi

Bu sistem, modüler okyanus şamandıralarından oluşmaktadır. Gelen dalgalar şamandıraları hareket ettirir. Elde edilen hareket enerjisi sistemdeki generatör ile elektrik enerjisine dönüştürülür. Üretilen elektrik enerjisi deniz altı iletim hattı ile karaya transfer edilir (Rodrigues, 2005).

Şekil 4.24’te sistemin resmi ve çalışması görülmektedir.



Şekil 4.24. Power buoy sistemi ve görüntüsü.

Her bir şamandıra, 4 m çapı ve 16 m uzunluğundadır ve 40 kW elektrik enerjisi üretebilmektedir. Su üzerinde kalan kısmı, deniz yüzeyinden yaklaşık 5 metre yukarıdadır. Power Buoy sistemi, kıyından 8 km uzaklıkta ve 40 ila 60 metre derinlikteki sularda da uygulanabilir.



**Şekil 4.25.** Power buoy kümesi (Rodrigues,2005).

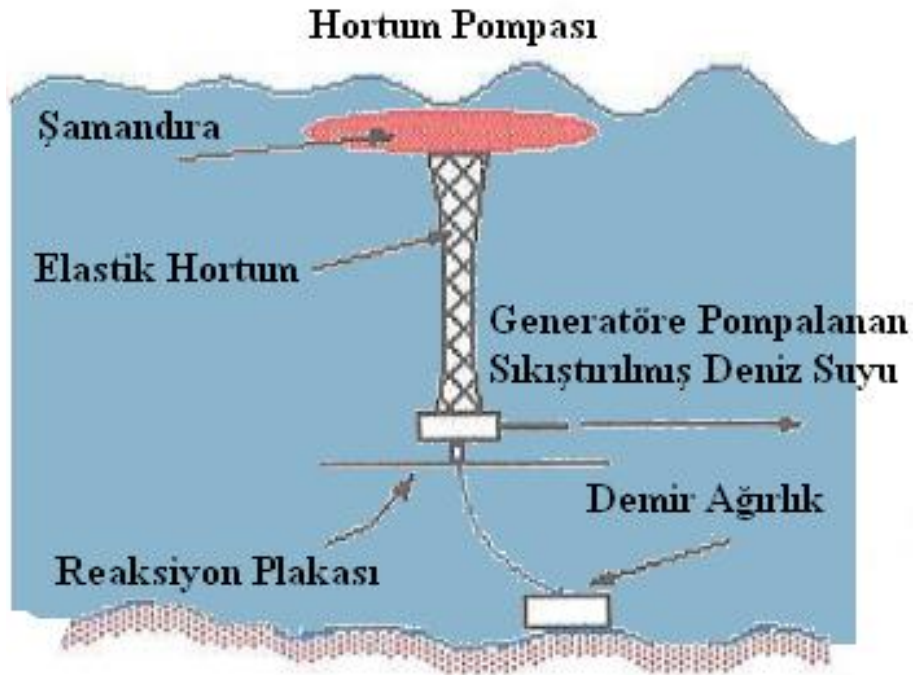
Power Buoy kümeleri 80 kW ve daha yüksek güçlerde enerji üretimi yapabilmektedir. Sık bakım gerektirmez ve fırtınalara dayanıklıdır. Fakat deniz akıntılarında olumsuz yönde etkilenir.

#### **4.2.14. Hortum pompası dalga enerjisi dönüşüm sistemi**

İsveç'te dalga pompası üzerine çalışmalar sonucu oluşturulan sistemdir. Dalga pompası esas alınarak tasarlanmıştır. En önemli parçası özel olarak güçlendirilen elastik bir hortumdur. Esnek olan bu hortumun çapı kısaldığında genişlemekte, uzadığında ise daralmaktadır. Sistem üç ana temel parçadan oluşur. Bunlardan ilki reaksiyon plakası olarak adlandırılır ve dibe monte edilir. Bu parçanın üzerinde pompa görevini yapabilen hortum bulunur. Hortum pompanın dalga tepe ve çukuru arasında değişimlerde uzayıp kısılabilmesine imkân vermesi amacıyla hortumun üzerinde bir şamandıra bulunmaktadır. Şamandıra dalga çukuru altında kaldığında sistemde aşağıya inen şamandıraya bağlı olan hortum kısalmış ve genişlemekte ve bunun sonucunda hortumun dış çeperini oluşturan metal ağ örgüsü gevşeyip hortumun içine su girmesine neden olmaktadır. Dalga tepesi altında kaldığında ise şamandıra yükselmekte ve

hortumun boyu uzamakta böylece hortumun metal ağ örgüsünü gerip hortumun içerideki suyu basmasına sebep olmaktadır. Hortum içinde sıkışan su çoğunlukla reaksiyon plakası ile hortumun arasına konulan bir düzenden sistemin dışındaki bir kollektöre basılmaktadır (Bkz. Şekil 4.26.).

“Kollektör” olarak adlandırılan bu hatta birçok hortum pompası enerji dönüşüm sistemi bağlanmak suretiyle her birinin çıkışına birer adet tek yönlü valf konulduğunda elde edilen enerji miktarının düzenli olacağı düşünülmektedir (Bak, 2003).



Şekil 4.26. Hortum pompası enerji dönüşüm sistemi.

#### 4.2.15. Kaimei Enerji Dönüşüm Sistemi

Kaimei Projesi Uluslararası Enerji Ajansı tarafından Büyük Britanya, Amerika Birleşik Devletleri, Kanada ve Japonya'nın katılımlarıyla yürütülmüştür. Proje Japon Deniz Bilimleri ve Teknoloji Merkezi (Japan Marine Science and Technology Centre – JAMSTEC) gözetiminde gerçekleştirilmiştir. Kaimei bir gemiye birkaç adet titreşimli su kolonu sisteminin yerleştirilmesiyle gerçekleştirilen bir çalışmadır. Gemi formundan dolayı denize açık olan kısımlar tek bir düzlem teşkil etmemektedirler (Bkz. Şekil 4.27.). Bu nedenle kullanılan sistemler beklenen düzeyde enerji dönüşümünü yapamamaktadır. Kaimei projesinden çıkarılan en önemli sonuç da budur. Kaimei

Projesi sırasında farklı generatörler ve farklı türbinler aynı anda test edilmiş ve bunlar arasında bir karşılaştırma yapılabilme olanağı yakalanmıştır. Sistemi taşıyan “gemi” 80 m uzunluğunda, 13 m genişliğinde ve 820 ton ağırlığındadır ve toplam 13 adet hava odasından oluşur. Hava odaları konvansiyonel titreşimli su kolonu sistemlerindeki kolonların görevini yapmaktadır. Kaimei Projesi üç ayrı teste tabi tutulmuş olup bunlardan ilki 1978-1979 yılları arasında yapılmıştır. Sistemde bir adet Wells Türbini, bir adet McCormick Türbini (tıpkı Wells gibi çift yönlü çalışabilen bir türbin) ve bir adet 4 supaplı bir türbin kullanılmıştır. İlk testler sonucunda toplam türbin kapasitesi 375 kW civarında olmuştur (Bak,2003).

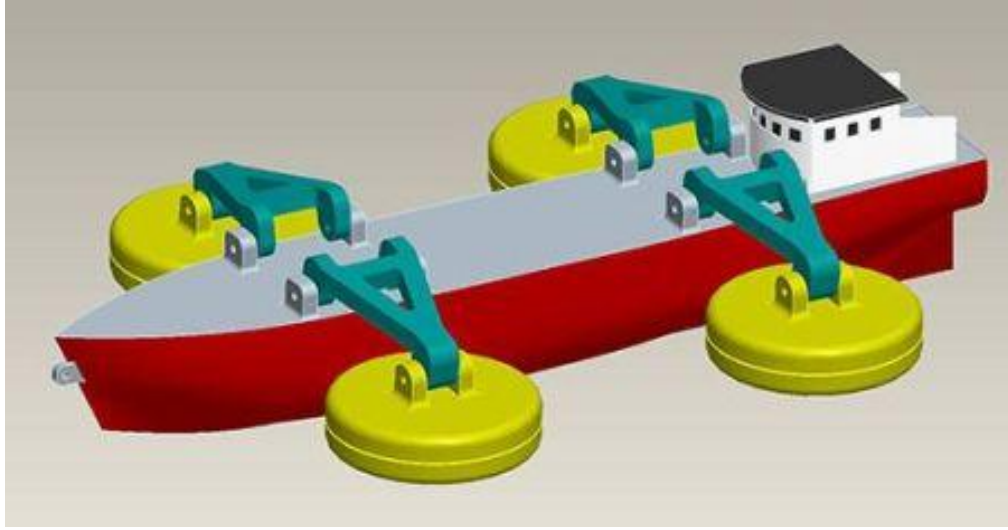


Şekil 4.27. Kaimei enerji dönüşüm sistemi.

#### 4.2.16. Dalga Botu ve Kırkayak Duba Modeli Enerji Dönüşüm Sistemi

50 m ve daha uzun gemiler için tasarlanan bu sistemle gemiler kendi elektrik enerjisini üreterek fosil yakıttan kurtulmaktadır (Bkz. Şekil 4.28.). Sadece gemilerin enerji gereksinimini karşılamak amacıyla değil aynı zamanda yerleşim yerleri ve fabrikalar içinde kullanılabilir. Aynı sistemin kara sürümü de mevcuttur (Bkz. Şekil 4.29.). Karadan deniz yüzeyine uzatılan 2 kollu şamandıra dalga hareketlerini hidrolik pompaya iletir. Pompa bir türbine hareket vererek türbinin generatörü tahrik etmesi sağlanır. Böylece elektrik üretimi gerçekleşmiş olur. Son zamanlarda deniz yüzeyine de sabitlenerek tasarlanan bu sistem oldukça verimlidir. Ayrıca bakımı kolay, kurulum maliyeti ise diğer sistemlere oranla oldukça düşüktür. Yakın gelecekte yaygınlaşacağı düşünülmektedir. Deniz yüzeyinde sabit duran tasarımı kırkayağı anımsatmaktadır (Bkz. Şekil 4.30.). Danimarka WAVE STAR firmasının geliştirdiği bu model, sağlı sollu duba dizilerinden oluşmaktadır. 20 dubalı kırkayak modeli 6 MW enerji üretebilmektedir. Her bir dubaya bağlı hidrolik pompalarla güç aktarımı yapılmaktadır.

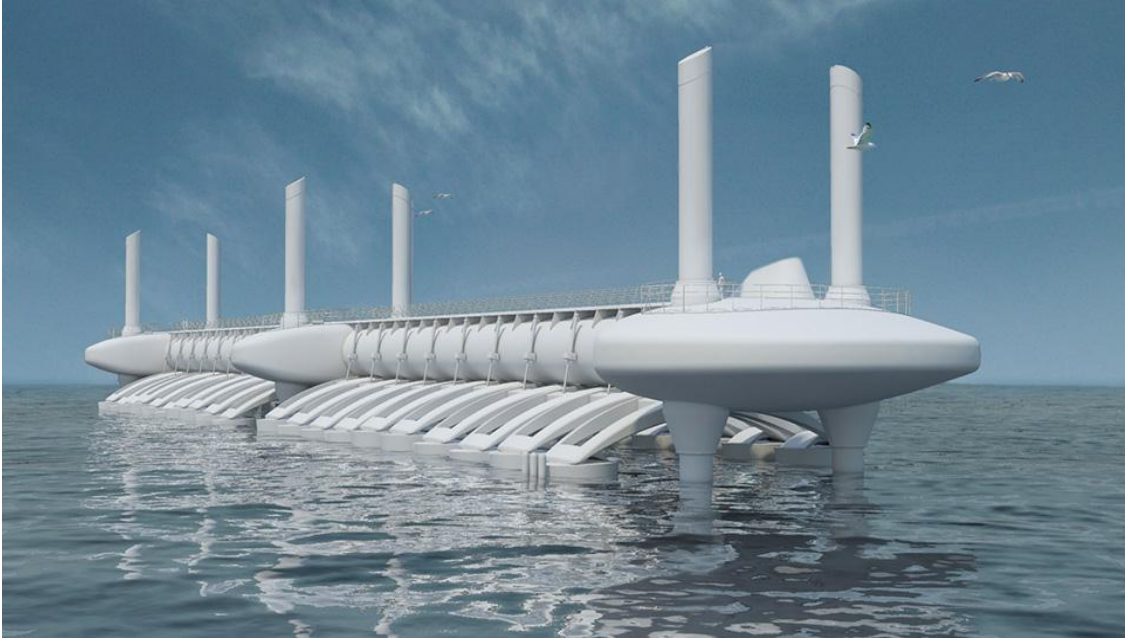
Hidrolik pompalarda 1 ya da daha fazla generatöre hareket vererek elektrik enerjisi üretilmektedir. Fırtınalı havalarda dubalar sabitlenerek sistem korunabilmektedir (Bkz. Şekil 4.31.).



Şekil 4.28. Dalga botu (Wave Boat).



Şekil 4.29. Dalga botu ve kırkayak modelinin kara versiyonu.



**Şekil 4.30** Kırkayak duba enerji dönüşüm sistemi.



**Şekil 4.31.** Fırtınalı havalarda dubaların sabitlenmesi.



**Şekil 4.32.** Kırkayak duba enerji dönüşüm sistemi.

Şekil 4.32.'de kırkayak duba enerji dönüşüm sisteminin kümelenmiş sistem görülmektedir. Her bir sistem 6 MW enerji üretir. Bu santralde toplam 60 MW enerji üretilmektedir.

### **4.3. Dalga enerjisi dönüşüm sistemlerinin çeşitliliği**

Dalga enerjisi dönüşüm sistemlerinin birçok yöntemi ve uygulaması mevcuttur. Önemli olanlarına bölüm 4'te değinilmiştir. Deniz dalgasının hareketi bu çeşitliliğe vesile olan önemli faktördür. Esas olan enerji dönüşümün verimliliği olduğundan birçok sistem sınıfta kalmaktadır. Dayanıklılık, bakım masrafları, kurulum maliyetleri de eklendiğinde birçok sistemi uygulamak anlamsız hale gelmektedir. Dalga enerjisi dönüşüm sistemlerinin olumlu ve olumsuz yönleri;

#### **4.3.1. Dalga enerjisi dönüşüm sistemlerinin olumlu yönleri**

- Dalga enerjisinin ve dalga dönüşüm sistemlerinin sosyal, ekonomik, çevresel vb. yönden birçok avantajı vardır.
- Dalga enerjisi temiz, doğal dengeyi koruyan, solunabilir temiz havayı sağlayan ve devamlı yinelenen doğal enerji kaynağıdır.
- Dalga hareketinin yinelenmesi (2-8s periyotla), akarsular gibi yılda bir veya iki kez yinelenen kaynaklara göre uygulanacak enerji dönüşüm sistemleriyle daha uzun süreli enerji elde edilmesini sağlamaktadır.
- Her dalga yüksekliğinden istenilen enerjinin alınabilmesi önemli bir avantajdır.
- Enerji dönüşüm sistemleri denize bıraktığı fiziksel, kimyasal ve organik kirletici etkisi olmaması nedeniyle çevre dostudurlar.
- Uygun dönüşüm sistemleri geliştirildiğinde büyük güce sahip dalgalardan önemli miktarlarda enerji elde edilebilmektedir.

- Adalar ve platformlar gibi açık deniz yapılarının elektrik ihtiyaçlarının kıyı bölgelerinden temin edilmesi güçlükleri karşısında bu yapılara yakın olarak tesis edilecek dalga enerjisi dönüşüm sistemleri ile enerji temini sağlanabilmektedir.
- Kıyıya yakın bölgelerde konuşlandırılan dönüşüm sistemleri daha yüksek verimle ve daha düşük maliyetle enerji üretebilmektedir.
- Birçok dalga enerji dönüşüm sistemi bu çalışmada seçilen sistem gibi enerji dönüşüm sistemi görevinin haricinde dalgakıran görevi üstlenerek dalga yüksekliklerinin azaltılmasında önemli rol oynar. Bunun sonucunda kıyı ve deniz yapılarının korunma imkânını sağlarlar.
- Dalgakıran özelliğiyle balık çiftlikleri, su altı balıkçılığı ve dalış gibi su altı sporları için uygun ortam oluştururlar.

#### **4.3.2. Dalga enerjisi dönüşüm sistemlerinin olumsuz yönleri**

Gerek dalgaların ve gerekse bu dalgalardan elde edilecek enerjinin temininde aşağıda ifade edilen güçlüklerle karşılaşmaktadır.

- Sistemlerin en verimli şekilde tasarlanabilmeleri ve dalga potansiyelinin belirlenebilmesi için dalga yüksekliğine, periyotlarına ayrıca bunların yıllık ve daha uzun dönem istatistikî değerlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Yüksek maliyet gerektiren çalışmalar yapılması gerekir.
- Dalga enerjisi dönüşüm sistemleri tasarlanırken konuşlandırılacakları yörenin rüzgâr ve dalga iklimine göre en verimli şekilde hesap yapılması gerekir.
- Dalga enerjisi dönüşüm sistemlerinde kullanılan türbinler, generatörler ve bağlantı elemanları açık deniz şartlarından (fırtına, büyük dalgalar) ve deniz suyunun kimyasal (korozyon, plankton vb.) etkilerinden olumsuz olarak etkilenirler. Bu yüzden deniz suyunun koroziv etkilerine karşı sistemlerin özel olarak tasarlanarak korunmaları gerekir.
- Enerji dönüşüm sisteminden elde edilen enerjinin iletilmesi için ihtiyaç duyulacak enerji nakil hatlarının tesis edilmesi ve daha sonraki bakım maliyetleri yüksek olmaktadır.
- Açık denizden karaya döşenen enerji nakil hatlarının kayıpları çok fazla olmaktadır. Açık denizde üretilen enerjinin en verimli piller olan lityum-iyon pilleri ile depolanarak karaya nakli ise lityum-iyon pillerinin ilk yatırım

maliyetleri, nakil bedelleri ve sınırlı pil ömrü nedeniyle ekonomik olamamaktadır.

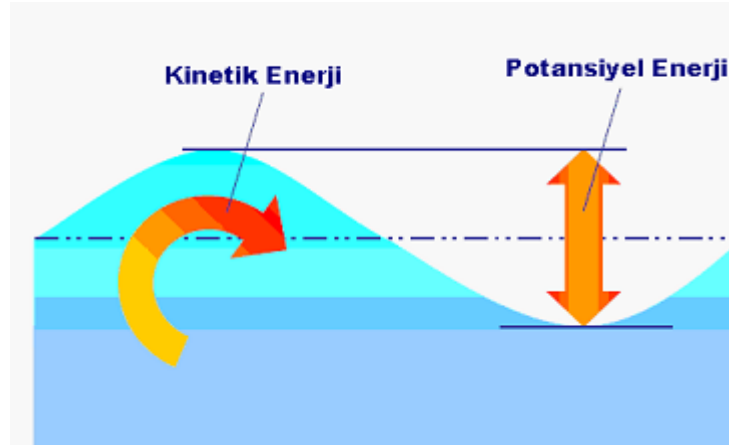
- Dalgalardaki enerjinin elektrik enerjisine dönüşümünü sağlayan dalga türbinlerinin nominal güçlerinin saptanmasında, mevcut ortalama dalga güç potansiyeli birinci derecede rol oynamaktadır. Elektrik enerjisi üretiminde, mevcut ortalama dalga gücünden daha büyük nominal güce sahip dalga türbinlerinin kullanılması, türbin gücünün büyük bir kısmının atıl kalması sonucunu doğurmaktadır. Bunun sonucunda da birim dalga elektriğinin maliyeti artmaktadır.
- Bu sistemler hidrodinamik çevre üzerinde etkileri olacağından yer seçiminde dikkatli olunması gündeme gelmektedir.
- Kıyı şeridi ve kıyıya yakın bölgelerde sistemlerde kullanılan Wells türbinlerinden kaynaklanan gürültü kirliliği gündeme gelebilir, bu yüzden yapıların ses geçirmez özellikte tesis edilmesi ihtiyacı doğar.
- Deniz trafiğinde tehlike oluşturabileceğinden, uygun, görsel ve radar uyarı sistemleri konulması ihtiyacı doğar.
- Kıyı ve yakın kıyı bölgelerinde estetik açıdan olumsuzluk oluşturabilir.

## 5. DALGA ENERJİSİ VE HESABI

### 5.1. Dalga Enerjisi Kavramı

Dalga enerjisi en yüksek enerji yoğunluğuna sahip olup, yaygın olarak kullanılan deniz/okyanus enerjisi türüdür. Bu durum, ülkelerin kendi kıyıları üzerinde yaptıkları dalga enerjisi potansiyelinin belirlenmesine dair çalışmalar ile de yaygınlaşmaya devam etmektedir. Okyanus ve iç denizlerdeki su yüzeyi değişimleri çeşitli etkiler altında deniz yüzeyine aktarılan enerjinin kaynağına, etki süresine ve gücüne bağlı olmaktadır. Deniz yüzeyi değişimlerinin salınım periyotları da değişimi oluşturan etkene bağlı olmaktadır. Bu durum, deniz yüzeyine rüzgârlar tarafından aktarılan enerjinin oluşturduğu ağırlık dalgaları, deniz yüzeyindeki toplam dalga enerjisinin oldukça büyük bir bölümüne denk gelmektedir. Başka bir deyişle, dalga enerjisinin oluşumu sürecinin temelinde, dünya üzerindeki deniz ve karaların farklı ısınması sonucu oluşan rüzgârların deniz yüzeyinde esmesi yatmaktadır. Bu süreçte denizde esen rüzgâr, sahip olduğu kinetik enerjiyi deniz yüzeyine aktarmaktadır. 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 (Bkz. Şekil 5.1.). Lineer bir dalganın ortalama kinetik enerjisi, potansiyel enerjisine yaklaşık olarak eşit olup, bir dalga ile taşınan enerji akısı dalganın yüksekliğine ve periyoduna bağlıdır.

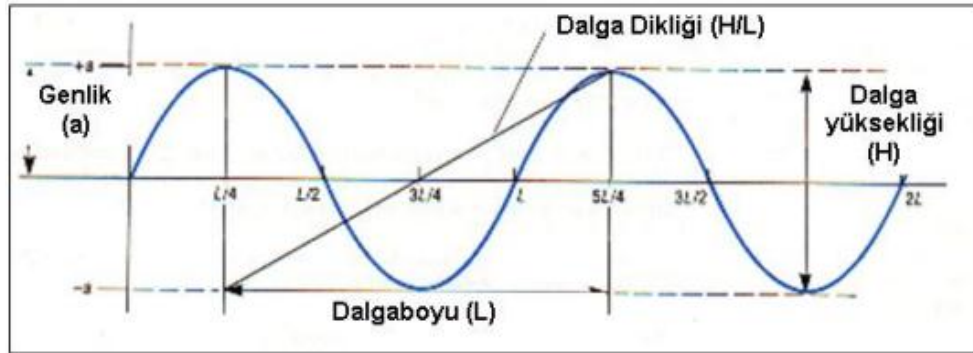


**Şekil 5.1.** Dalgada depolanan kinetik ve potansiyel enerji (Uygur, vd.,2004).

Rüzgâr etkisi ile oluşan dalgalar, rüzgârların oluştukları bölgede yarattıkları ve fırtına süresince giderek gelişen ve enerjisi artan ağırlık dalgaları ve rüzgâr etkisi sona erdikten sonra, oluşum bölgesinin dışında, enerjisi taşımaya devam eden ölü deniz dalgaları olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Ölü deniz dalgalarının periyotları 30 sn.den daha uzun iken, aktif ağırlık dalgalarının periyotları 1-15 sn. arasında gerçekleşmektedir. Bu açıdan bakıldığında, dalga enerjisinde ana kaynak rüzgâr etkisi altında meydana gelen ağırlık dalgaları olup, bu bölümde dalga tanımı ile ağırlık dalgaları tanımlanmaktadır. Ağırlık dalgalarının doğal enerji dengesi içindeki işlevleri rüzgâr etkisi ile atmosferden aldıkları enerjisi kıyıya kadar taşıyarak sahilde kara ile etkileşim sonucunda ısı ve ses enerjisine dönüştürerek etkin enerji formundan çıkarmak, hidrodinamik tanımlamayla harcanmasını sağlamaktır. Diğer taraftan, dalgalar tarafından kıyıya taşınan enerji insan yaşamını olumsuz etkileyen fakat doğal yaşama katkı yapan önemli bir etkidir. Dalga enerjisinden yararlanma yönündeki araştırmalar, kıyıya ulaşan ve sonunda harcanan bu önemli enerji kaynağının kullanılabilir enerji türlerine dönüştürerek dünyanın enerji talebinin belirli miktarının temiz enerji sistemleri ile karşılanmasına katkıda bulunmaktadır.

### 5.1.1. Dalgaların Genel Özellikleri

Dalga enerjisinin önemli bir kısmı sığ sularda, kıyılarda ve sarp kayalıklarda etkilidir. Dalgalar son derece güçlüdür ve büyük dalgaların kıyılarda metre kareye 10 ton civarında bir kuvvet uyguladığı tahmin edilmektedir. Genel olarak dalga ideal bir sinüs eğrisi olarak (Bkz. Şekil 5.2.) tanımlanmakta, dalga yüksekliği ve dalga boyu temel özellikler olarak ele alınmaktadır.



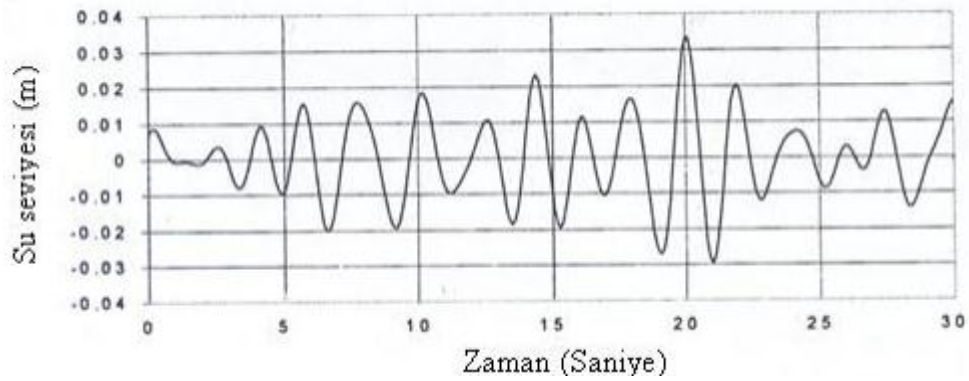
Şekil 5.2. Dalganın karakteristiği (Uygur, vd., 2004).

Deniz ortamındaki dalgalar, rüzgârların deniz yüzeyine aktardığı enerjinin yayılımı şeklinde oluşan ağırlık dalgalarıdır ve çok sayıda tekil dalganın süperpoze olması ile meydana gelen düzensiz dalgalar olarak tanımlanırlar. Bu açıdan ele alındığında deniz ortamındaki dalgaların karakterize edilmesinde farklı amaçlar için farklı dalga yükseklikleri kullanılmaktadır (Bkz. Çizelge 5.1.).

Çizelge 5.1. Açık deniz dalga karakteristik yükseklikleri (Kabdaşlı, 1992).

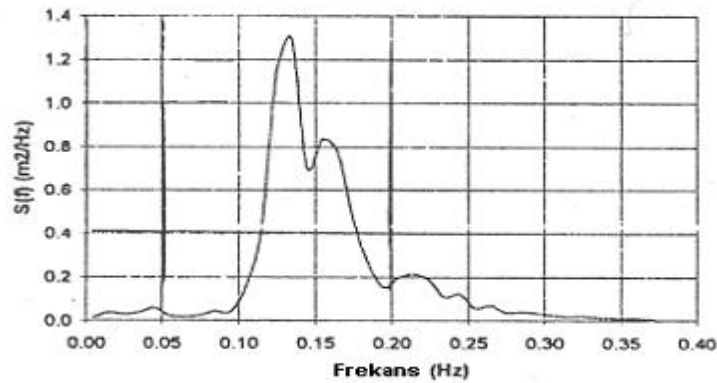
Dalga İsmi	Tanımı	Gösterimi
Belirgin dalga yüksekliği	En büyük %30'un ortalaması	$H_s$ (açık denizde $H_0$ )
Ortalama dalga yüksekliği	Tüm serinin ortalaması	H
$H_{1/10}$	En büyük %10'un ortalaması	$H_{1/10}$
Maksimum dalga yüksekliği	Serinin maksimum değeri	$H_{maks.}$

Deniz ortamında herhangi bir fırtına sırasında oluşan dalgaların, deniz yüzeyi profili birbirinden farklı yükseklik ve periyottaki dalgalardan meydana gelmektedir ve fırtınada oluşan dalgaların asgari ile azami düzeyi arasında çok büyük farklılıklar oluşmaktadır (Bkz. Şekil 5.3.).



Şekil 5.3. Su yüzeyi profili örneği (Kabdaşlı vd.,2007).

Her dalga enerjisinin, yüksekliğinin karesi ile orantılı olduğu olması, kıyıdaki herhangi bir noktaya dalgalar tarafından taşınan enerjinin de değişik değerlerde olacaktır. Bu sebeple deniz ortamındaki mühendislik yapılarının boyutlandırılmasında bir fırtınanın karakterize edilmesi amacıyla fırtına sırasında oluşan dalgaların toplam enerjisinden hareket edilmekte ve spektral analiz yaklaşımı ile belirgin dalga yüksekliği tanımı yapılmaktadır. Deniz dalgalarının spektrumu Şekil 5.4.'te verildiği gibidir. Bu spektrumun altında kalan alan fırtınadaki toplam dalga enerjisini vermektedir.



Şekil 5.4. Dalga spektrumu (Kabdaşlı vd. 2007).

Diğer taraftan deniz dalgaları oluşan fırtınanın hızına ve fırtına süresine bağlı olarak değişim gösterirler. Dolayısı ile her hangi bir kıyı bölgesindeki potansiyel dalga enerjisinin hesabında iklimin belirleyici rolü bulunmaktadır.

### 5.1.2. Dalga enerjisinin hesabı

Dalga Enerjisi literatürde çeşitli tanımlar altında ifade edilebilmektedir. En basit hali ile enerji akısı fizikteki kavramlar cinsinden aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$Enerji Akısı = \Phi = \frac{Güç}{Alan} = \frac{Enerji}{Alan \times Zaman} \quad (4.1)$$

olup, enerji ise:

$$E = Kuvvet \times Yol \quad (4.2)$$

Küçük genlikli dalga teorisine göre, birim alana gelen sinüzoidal dalgalar tarafından iletilen enerji ise:

$$E = \frac{1}{8} \rho \times g \times H^2 \quad (4.3)$$

Olarak tanımlanmaktadır (burada H dalga yüksekliği,  $\rho$  deniz suyunun özgül kütlesi ve g yerçekimi ivmesidir) (Kabdaşlı, 1992).

Sinüzoidal olmayan dalga durumunda ise dalga enerji spektrumundan bulunan anlamlı dalga yüksekliği kullanılmaktadır. (Bkz. Şekil 5.3.) ifadesinin  $C_g$  dalga yayılma hızı ile çarpılması ile de birim boya karşı gelen güç bulunmuş olur (Uygur, vd., 2004).

$$P = \frac{1}{8} \rho \times g \times H^2 \times C_g \quad (4.4)$$

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

$$C_g = \frac{c}{2} \quad (4.5)$$

$$C = \frac{L}{T} \quad (4.6)$$

$$L = \frac{g \cdot T^2}{2\pi} \quad (4.7)$$

Buna göre (4.4) ifadesi yeniden düzenlenir ise:

$$J(W/m) = \frac{1}{32\pi} \times \rho \times g^2 \times H^2 \times T \quad (4.8)$$

k değeri ise:

$$k = \frac{1}{32\pi} \rho \times g^2 \quad (4.9)$$

k değerini yerine yazarsak:

$$J(W/m) = k \times H^2 \times T \quad (4.10)$$

ifadesi elde edilir.

Sinüzoidal dalgalar için k katsayısı  $976 \text{ W/s.m}^3$  olarak hesaplanmaktadır. Deniz koşullarında sinüzoidal olmayan dalga halinde, bu katsayı için literatürde farklı değerler verilmekle birlikte, genel olarak  $300$  ile  $500 \text{ W/s.m}^3$  arasında olacağı belirtilmektedir. Mevcut rüzgâr verilerinden yararlanılarak istasyonun yer aldığı kıyının coğrafi konumuna bağlı olarak enerji üretilebileceği düşünülen yönlerde seçilen bir  $u_0$  rüzgâr hızının üzerindeki fırtınalar için hesaplanan ortalama rüzgâr hızı kullanılarak bu fırtınaların oluşturacağı dalgaların karakteristikleri ( $H_s$ , m;  $T$ , s) ve birim boya karşı gelen güçleri ( $J$ ,  $\text{W/ m}$ ) hesaplanabilmektedir. (Kabdaşlı, vd., 2007; Ivanova vd., 2005; Hagerman ve Bedard, 2005).

## 6. DENEYSEL UYGULAMA VE DEĞERLENDİRME

### 6.1. Deney Düzeneginin Belirlenmesi

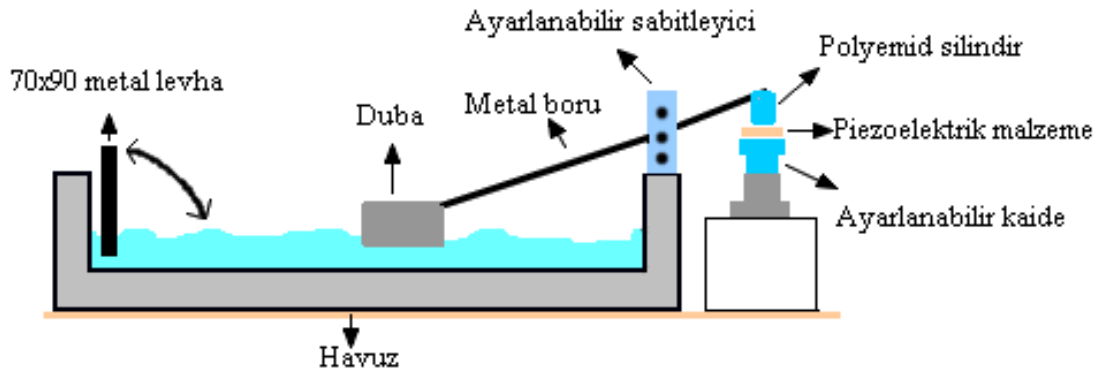
Piezoelektrik malzeme kullanarak suya dayalı sistemlerden enerji üretmek oldukça zorlu bir süreçtir. Bunun nedeni literatürde bu tür bir çalışmanın olmaması. Sadece fikir olarak birkaç örnek mevcuttur. Fakat bu tür bir uygulama mevcut değildir. Piezoelektrik malzemenin enerji üretimindeki çalışma prensibi dikkate alınarak ortaya atılan bu fikirler uygulamada henüz maliyetli ve verimi oldukça düşük olacaktır. Kurulum, bakım, amorti süresi vb. durumlardaki bilinmezlik bu tür çalışmaların olmamasına neden olmaktadır. Piezoelektrik malzemelerin hareketli ve titreşimli her ortamda elektrik ürettiği yapılan çalışmalar sonucunda görülmektedir. Suya dayalı enerji dönüşüm sistemlerinde suyun hareketleri piezoelektrik malzeme kullanılması durumunda enerji almak mümkündür.

Suya dayalı enerji dönüşüm sistemlerine bakıldığında dalga enerjisinden piezoelektrik malzeme ile enerji üretmek oldukça makul görülmektedir. Piezoelektrik malzemedan enerji almak için gerekli olan doğrusal hareket ve güç yoğunluğu dalga enerjisinde mevcuttur. Bizde çalışmalarımızı dalga enerjisi kullanarak yaptık.

### 6.2. Deney Düzenegi

Çalışmalar, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Meslek Yüksekokulunda bulunan 75cm derinliğinde, 4m uzunluğunda ve 1,5m ile 2m genişliğinde kenarları 30 cm kalınlığında duvar olan süs havuzunda gerçekleştirilmiştir. Havuzun bir ucuna dalga üretebilmek için 70cm genişliğinde, 90cm uzunluğunda hareketli metal levha yerleştirilmiştir. Havuzun diğer ucuna ise kaldırma tipi deney düzenegi yerleştirilmiştir. Deney düzenegi (Bkz. Şekil 6.1.) 1.5m uzunluğunda metal borunun bir ucuna 30 litrelik duba amaçlı bidon sabitlenmiş diğer ucuna piezoelektrik malzemeye basınç yapacak hareketli polyamid silindir eklenmiştir. Metal borunun havuz kenarına sabitlenmesi için ayarlanabilir metal sabitleyici eklenmiştir. Böylece kaldırma kısmının uzunluğu kısalığı ayarlanabilmektedir. Ayrıca sabitleyicinin üzerinde havuzun doluluk oranına göre yüksekliği ayarlanabilen delikler mevcuttur. Kaldırmanın basınç yaptığı kısımda ise yüksekliği ayarlanabilir polyamid ve metal parçalardan oluşan hareketli kaide eklenmiştir. Piezoelektrik malzeme polyamid silindir ile kaide arasına konulmuştur.

Oluşan dalgalar dubaya hareket vererek kaldırıcın ucuna baskı yapmaktadır. Polyemid silindir ile kaide arasında bulunan piezoelektrik malzeme dalgaların periyoduna göre pasınca maruz kalmaktadır. Şekil 6.2.'de deney düzeneğinin görüntüsü görülmektedir.



Şekil 6.1. Deney düzeneğinin şematik görüntüsü.



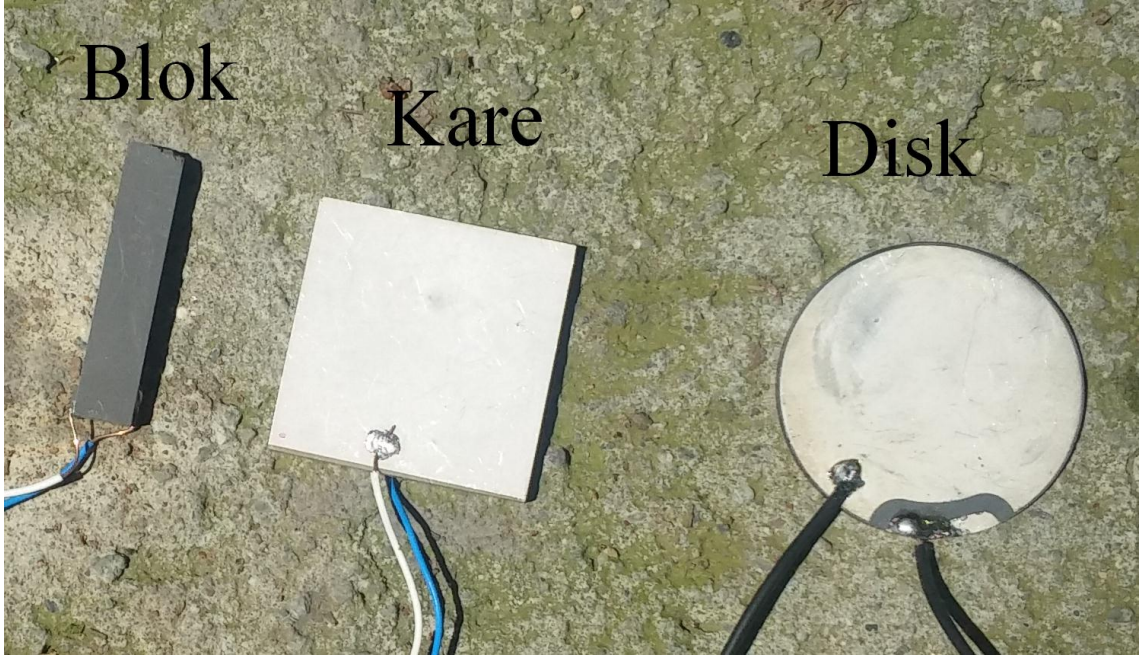
Şekil 6.2. Deney düzeneğinin görüntüsü.



Şekil 6.3. Deney düzeneğinin görüntüsü

### 6.3. Deneyin Uygulaması ve Aşamaları

Gerekli testlerden sonra deney uygulamasına geçilmiştir. Deney üç farklı PZT kullanılarak (Bkz. Şekil 6.4.) üç aşamada gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 6.4.** Deneylerde kullanılan Piezoelektrik malzemeler.

Şekil 6.4. de görülen piezoelektrik malzemelerin analizleri çizelge 6.1 de gösterilmektedir.

**Çizelge 6.1.** Analizi yapılan piezoelektrik malzemeler.

Malzeme	Yüzey Alanı	Kalınlığı	Dayanıklılık	Malzemenin İçeriği	Çıkış Gerilimi
Kare	20.25cm <sup>2</sup>	0.5cm	Yüksek	PZT	4.2V
Disk	19.62cm <sup>2</sup>	0.3cm	Yüksek	PZT	3.19V
Blok	4.8cm <sup>2</sup>	0.7cm	Yüksek	PZT	3.1V

#### 6.3.1. Deney uygulaması 1

Birinci aşamada kare şeklindeki PZT seramik kullanılarak deney gerçekleştirilmiştir. Metal levha ile oluşturulan dalgalar dubayı hareket ettirerek

kaldıraca doğrusal hareket vermiştir. Kaldıracın ucunda bulunan polyemid silindir, silindir ile kaide arasında konulan kare şeklindeki PZT malzemeye belirli periyotlarda basınç yapmıştır (Bkz. Şekil 6.5.). Yapılan basınçlar sonucunda, dalga boyuna ve periyoduna göre piezoelektrik malzemedan zamana bağlı olarak farklı voltaj ve akım değerleri elde edilmiştir.



**Şekil 6.5.** Kare tipi PZT malzemenin silindir ile kaide arasındaki görüntüsü.

### 6.3.2. Deney uygulaması 2

İkinci aşamada disk şeklindeki PZT seramik kullanılarak deney gerçekleştirilmiştir. Metal levha ile oluşturulan dalgalar dubayı hareket ettirerek kaldıraca doğrusal hareket vermiştir. Kaldıracın ucunda bulunan polyemid silindir, silindir ile kaide arasında konulan disk şeklindeki PZT malzemeye belirli periyotlarda basınç yapmıştır (Bkz. Şekil 6.6.). Yapılan basınçlar sonucunda, dalga boyuna ve periyoduna göre piezoelektrik malzemedan zamana bağlı olarak farklı voltaj ve akım değerleri elde edilmiştir.



**Şekil 6.6.** Disk tipi PZT malzemenin silindir ile kaide arasındaki görüntüsü.

### 6.3.3. Deney uygulaması 3

Üçüncü aşamada blok şeklindeki PZT seramik kullanılarak deney gerçekleştirilmiştir. Metal levha ile oluşturulan dalgalar dubayı hareket ettirerek kaldıraca doğrusal hareket vermiştir. Kaldıracın ucunda bulunan polyamid silindir, silindir ile kaide arasında konulan blok şeklindeki PZT malzemeye belirli periyotlarda basınç yapmıştır (Bkz. Şekil 6.7.). Yapılan basınçlar sonucunda, dalga boyuna ve periyoduna göre piezoelektrik malzemedeki zamana bağlı olarak farklı voltaj ve akım değerleri elde edilmiştir.

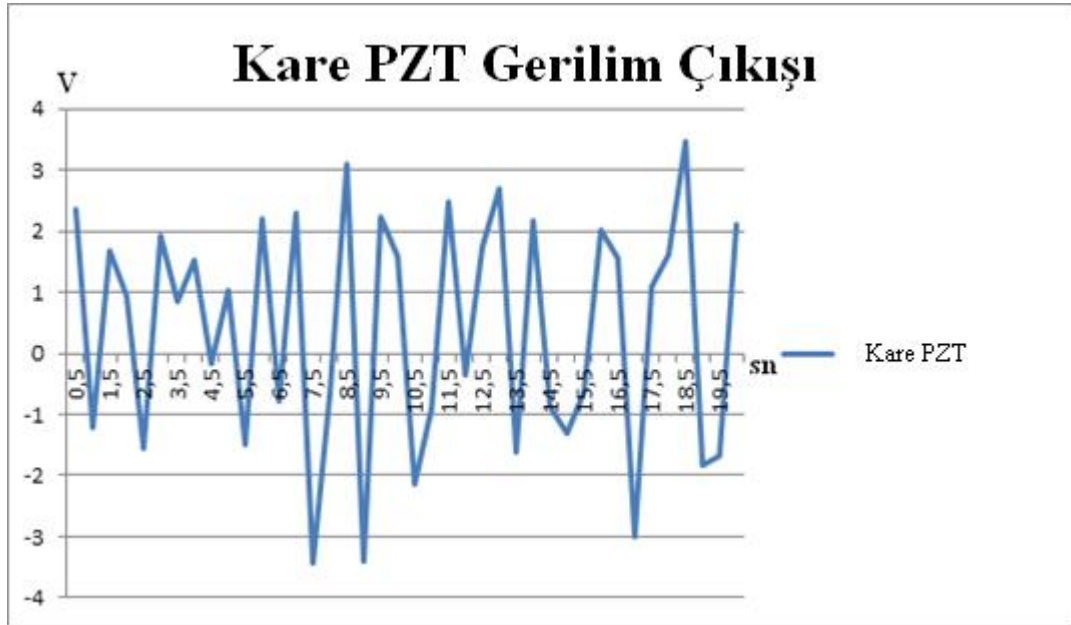


Şekil 6.7. Blok tipi PZT malzemenin silindir ile kaide arasındaki görüntüsü.

## 6.4. Deney Sonuçları ve Değerlendirme

### 6.4.1. Deney uygulaması 1 sonuçları

Deney aşama 1 sonuçlarına göre kare tipi PZT malzemeden enerji üretilebilmiş ve herhangi 20 sn anında 0.5sn aralıklarla ölçülen çıkış voltajları şekil 6.8.'de gösterilmiştir.



Şekil 6.8. Kare PZT gerilim çıkışları 0,5 sn aralıklarla.

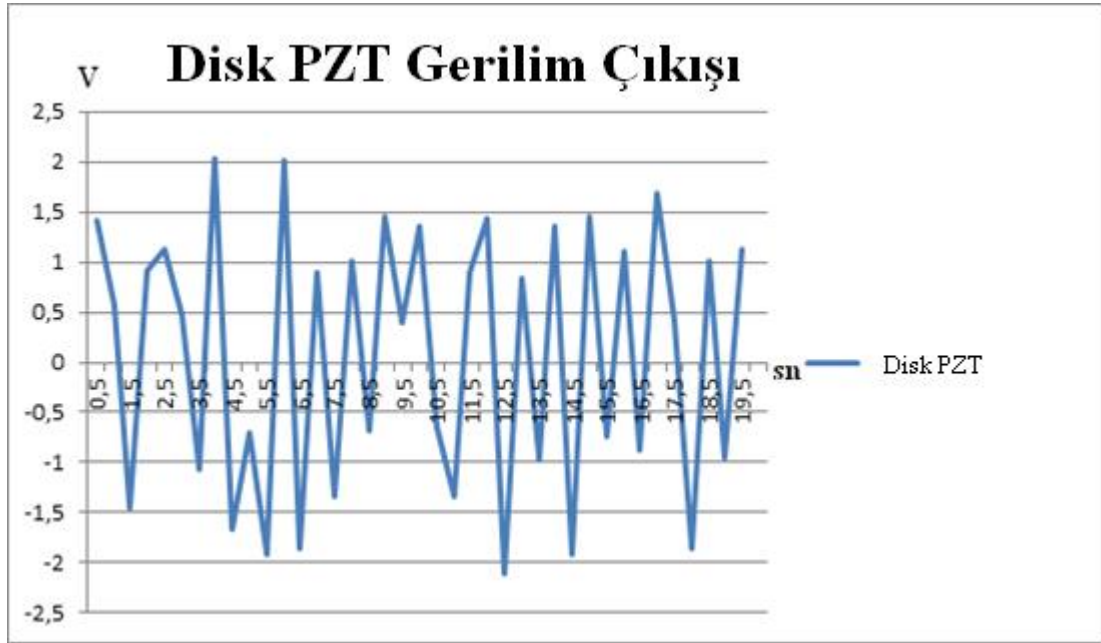
Kare tipi PZT malzemenin voltaj çıkışlarına bakıldığında maksimum 3,45V ürettiği görülmektedir (Bkz. Çizelge 6.2). Bu oran kare tipi PZT'nin standart maksimum 4,2V değerine yakındır.

Çizelge 6.2. Kare tipi PZT malzemenin zamana bağlı çıkış gerilimleri.

Saniye	Çıkış V	Saniye	Çıkış V	Saniye	Çıkış V	Saniye	Çıkış V
0,5	2,354	5,5	-1,48	10,5	-2,124	15,5	-0,62
1	-1,225	6	2,201	11	-0,906	16	2,014
1,5	1,689	6,5	-0,777	11,5	2,49	16,5	1,545
2	0,936	7	2,299	12	-0,342	17	-3,013
2,5	-1,569	7,5	-3,442	12,5	1,753	17,5	1,104
3	1,933	8	-0,652	13	2,701	18	1,618
3,5	0,862	8,5	3,098	13,5	-1,63	18,5	3,45
4	1,515	9	-3,412	14	2,156	19	-1,82
4,5	0,18	9,5	1,22	14,5	-0,863	19,5	-1,673
5	1,026	10	1,573	15	-1,304	20	2,117

### 6.4.2. Deney aşama 2 sonuçları

Deney aşama 2 sonuçlarına göre disk tipi PZT malzemeden enerji üretilebilmiş ve herhangi 20 sn anında 0.5sn aralıklarla ölçülen çıkış voltajları şekil 6.9'da gösterilmiştir.



Şekil 6.9 Disk PZT voltaj çıkışları 0,5 sn aralıklarla.

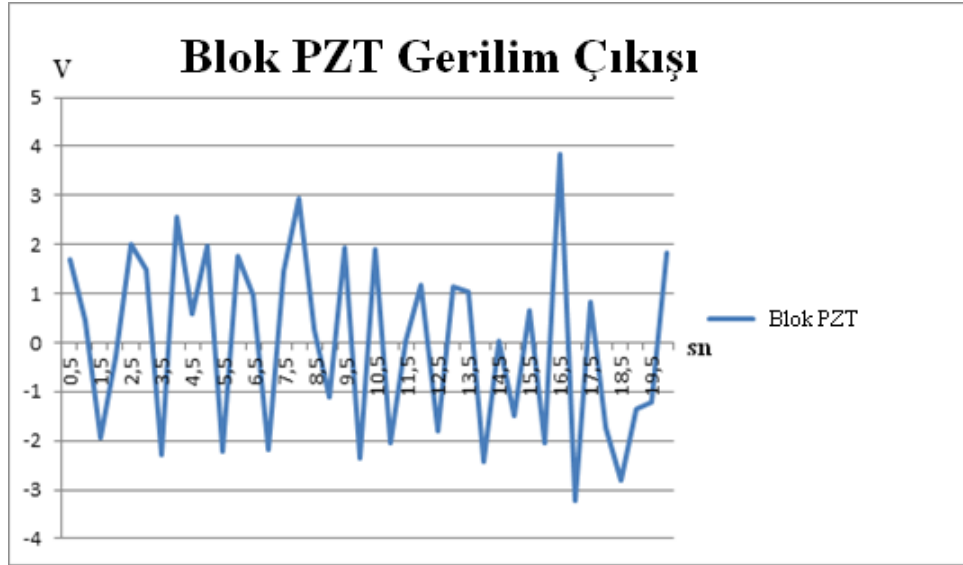
Disk tipi PZT malzemenin voltaj çıkışlarına bakıldığında maksimum 2,105V ürettiği görülmektedir (Bkz. Çizelge 6.3.). Bu oran disk tipi PZT'nin standart maksimum 3,19V değerine yakındır.

Çizelge 6.3. Disk tipi PZT malzemenin zamana bağlı çıkış gerilimleri.

Saniye	Çıkış V	Saniye	Çıkış V	Saniye	Çıkış V	Saniye	Çıkış V
0,5	1,41	5,5	-1,917	10,5	-0,64	15,5	-0,745
1	0,56	6	2,015	11	-1,340	16	1,115
1,5	-1,45	6,5	-1,857	11,5	0,95	16,5	-0,875
2	0,92	7	0,9	12	1,43	17	1,675
2,5	1,13	7,5	-1,34	12,5	-2,105	17,5	0,405
3	0,470	8	1,015	13	0,842	18	-1,855
3,5	-1,075	8,5	-0,675	13,5	-0,965	18,5	1,005
4	2,035	9	1,445	14	1,355	19	-0,995
4,5	-1,655	9,5	0,404	14,5	-1,905	19,5	1,125
5	0,705	10	1,352	15	1,460	20	0,445

### 6.4.3. Deney aşama 3 sonuçları

Deney aşama 3 sonuçlarına göre blok tipi PZT malzemeden enerji üretilebilmiş ve herhangi 20 sn anında 0.5sn aralıklarla ölçülen çıkış voltajları şekil 6.10'da gösterilmiştir.



Şekil 6.10. Blok PZT voltaj çıkışları 0,5 sn aralıklarla.

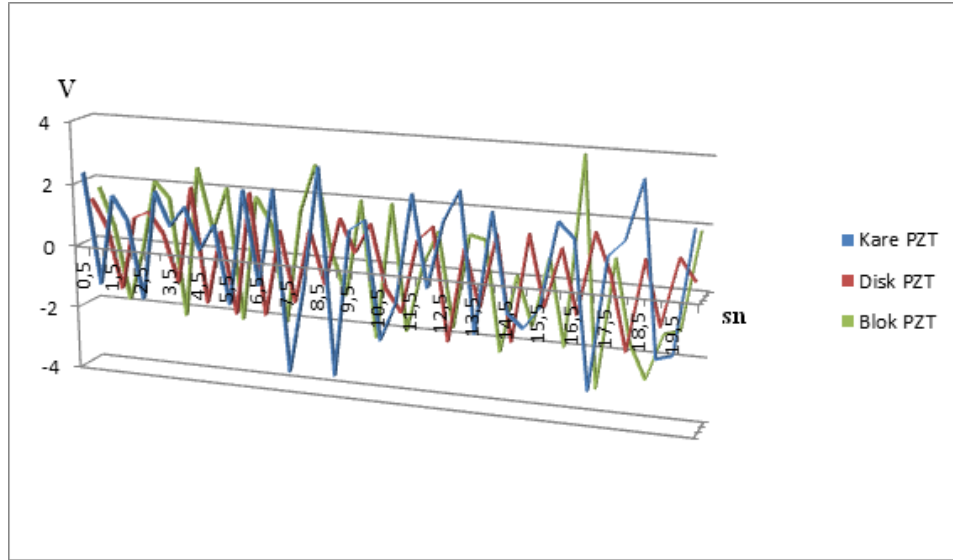
Blok tipi PZT malzemenin voltaj çıkışlarına bakıldığında maksimum 3,847V ürettiği görülmektedir (Bkz. Çizelge 6.4). Bu oran blok tipi PZT'nin standart 3,1V değerini geçmiştir.

Çizelge 6.4. Disk tipi PZT malzemenin zamana bağlı çıkış gerilimleri.

Saniye	Çıkış V	Saniye	Çıkış V	Saniye	Çıkış V	Saniye	Çıkış V
0,5	1,691	5,5	-2,211	10,5	1,911	15,5	0,673
1	0,454	6	1,782	11	-2,054	16	-2,054
1,5	-1,928	6,5	0,98	11,5	0,017	16,5	3,847
2	-0,281	7	-2,177	12	1,165	17	-3,237
2,5	2,02	7,5	1,444	12,5	-1,801	17,5	0,821
3	1,503	8	2,936	13	1,147	18	-1,729
3,5	-2,282	8,5	0,292	13,5	1,022	18,5	-2,805
4	2,561	9	-1,111	14	-2,415	19	-1,355
4,5	0,59	9,5	1,94	14,5	0,024	19,5	-1,197
5	1,99	10	-2,369	15	-1,5	20	1,836

#### 6.4.4. Deneş aşama 1-2-3 sonuçları karşılaştırması

Deneş aşama 1-2-3 gerilim çıkışlarının karşılaştırılması Şekil 6.11.'te gösterilmiştir.



Şekil 6.11. Kare, disk ve blok PZT malzemelerin voltaj çıkışlarının karşılaştırılması.

Şekil 6.11.'e göre blok tipi PZT malzemenin enerji üretimi en yüksek olurken disk tipi PZT ise en düşük enerji üretimini gerçekleştirmiştir.

#### 6.5. Deneş Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Deneşlerden elde edilen sonuçlara göre dalga enerjisi kullanarak piezoelektrik malzemenin enerji retilabileği ve malzemenin maksimum değerine ulaşılabileceği görülmektedir. Blok tipi PZT malzemenin alan oranına göre diğer malzemelere göre fazla enerji ürettiği görülmektedir. Bu durum PZT malzemenin kalınlığının da önemli olduğunu göstermektedir. Kalınlık arttıķa sıkışma ve gerilme miktarının da artmasından dolayı enerji üretimi artmaktadır. PZT malzemelerin ticari boyutlarda enerji üretmesi hali hazırda mümkün değildir. Bunun nedeni ise mW seviyelerinde g retilmelerindedir. rnek olarak 25mm çapında disk tipi PZT malzeme 4,6 mW güç üretilmektedir (Makki, 2012). Fakat bu metotlar için özel tasarımı ve üretimler gerekmektedir. Bu durum üretililecek güç yoğunluğunu mutlaka değiştirecektir. Fakat maliyetlerinde oldukça artmasına neden olacaktır.

### 6.5.1. Tartışma

Deneylelerden elde edilen sonuçlarda dalga enerji kullanılarak piezoelektrik malzemenin enerji üretmek mümkün ve piezoelektrik malzemenin maksimum gücüne ulaşabildiği görülmektedir. Hâlihazırda üretilen malzemeler farklı amaçlar içindir. Enerji hasadı amaçlı piezoelektrik malzeme üretimi ve çalışmaları oldukça az ve yetersiz olmaktadır. Bu durum doğru sonuçların alınmasını zorlaştırmaktadır. Özel üretim ve doğru elektronik kartların kullanılmasıyla elde edilecek güçler farklı olacaktır.

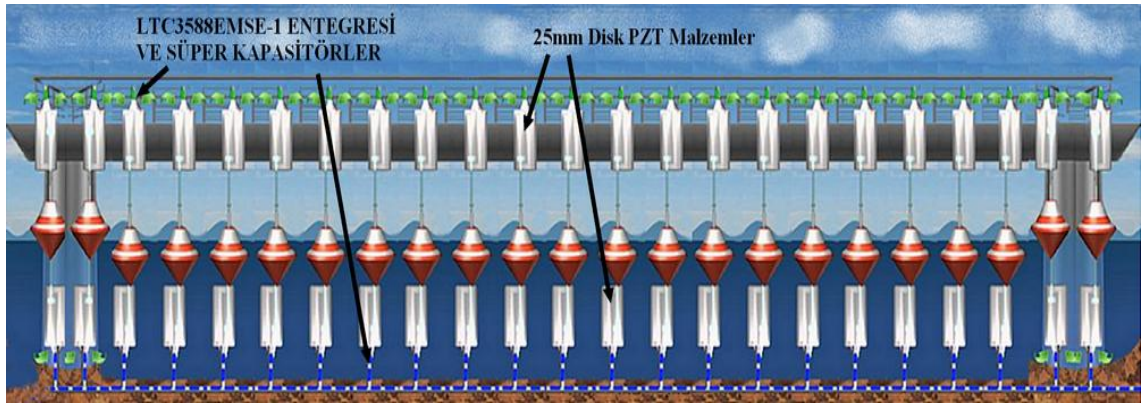
Deney sonuçlarına göre blok tipi PZT malzemenin enerji üretimi oldukça yüksektir. Yüzey alanı az olmasına rağmen disk tipi ve kare tipi PZT malzemelerden daha yüksek voltaj çıkışı vermektedir. Bu durumda kalınlığın artması üretilecek enerji miktarını da artırmaktadır. Üretilecek PZT malzemenin kalınlığı arttıkça vereceği sonuçlar çok farklı olacaktır. Kare tipi PZT malzemenin voltaj çıkışları disk tipi PZT malzemeye göre daha yüksektir. Bu farklılığın nedeni de kalınlık olmaktadır. Kare tipi PZT 0,5cm iken disk tipi PZT 0,3cm'dir. Bu sonuçlara göre PZT malzemelerde alanın yanında kalınlığın da önemi oldukça yüksek olduğu görülmektedir.

### 6.6. PZT Malzeme Kullanarak Kurulabilecek Santralin Yaklaşık Güç Hesabı ve Maliyeti

Piezoelektrik malzeme kullanarak deniz dalgasından enerji üretebilmek için öncelikle uygun yapının belirlenmesi gerekir. Dalga enerjisi dönüşüm sistemlerine baktığımızda hemen hemen tüm metotlarla piezoelektrik malzeme kullanarak enerji üretmek mümkündür. Piezoelektrik malzemelerin güç aralıklarının oldukça düşük olması, kurulacak santralin tasarlanmasına yardımcı olacaktır. Çoklu duba yöntemleri kullanılabilir.

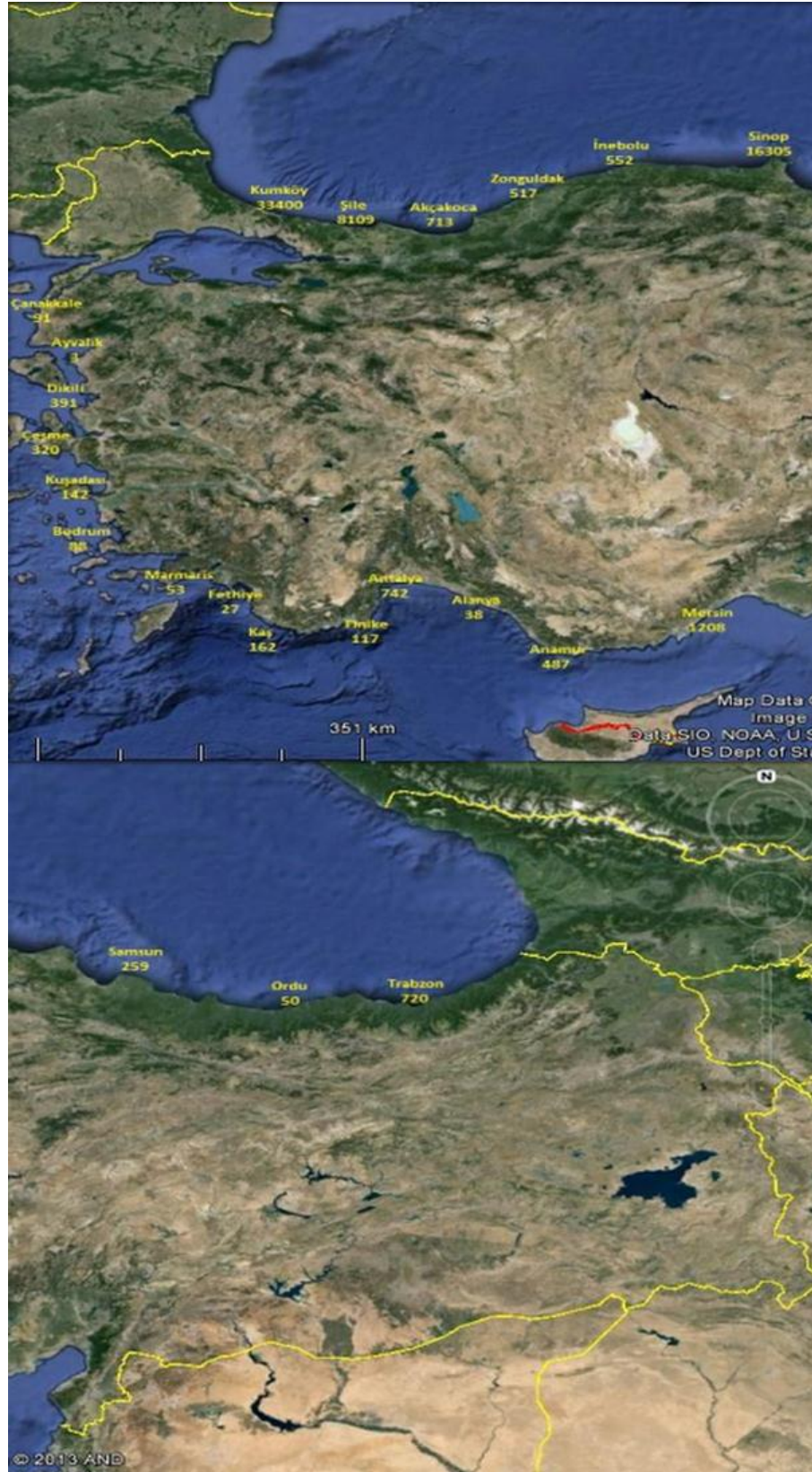
Öncelikle kullanılacak PZT malzemenin belirlenmesi gerekir. Güç seviyesi yüksek ve alandan kazanmak için yüzey alanı dar olan PZT malzeme kullanılması uygun olacaktır. 25mm çapında ve 4.6mW gücündeki PZT malzeme kullanılarak bir santral kurulabilir. Deniz yüzeyine sabitlenmiş bir platform üzerine sıralı dubalar yerleştirilerek sistem kurulur. Her bir duba çift yönlü basınç yapacak şekilde metal borulara sabitlenip, bu boruların ucunda bulunan pistonları hareket ettirerek PZT malzemelere basınç ve gerilme uygular. Her bir piston 10 adet PZT malzemeye

mekanik güç sağlayabilir. 10 adet üst kısımda ve 10 adet alt kısımda olmak koşulu ile her bir dubaya 20 adet PZT malzeme sabitlenebilir. Üretilen güç PZT malzeme başına oldukça düşük ve frekansı yüksek olacağı için doğrultma elemanı kullanmak gerekecektir. PZT gerilim çıkışları farklı olacağı için her PZT malzeme için doğrultucu kullanmak gerekir. Kullanılacak doğrultucunun çok az güç harcaması gerekir. Bunun için en uygun LTC3588EMSE-1 enerji harmanlayıcı devresi olacaktır. 10'arlı PZT grupları çıkışlarına ise yüksek kapasiteli kondansatör konularak depolama işlemi sağlıklı hale getirilir. Şekil 6.12.'de kurulması hedeflenen platform görülmektedir. Platform sağ yanında 23 adet, sol yanında da 23 adet olmak üzere 46 dubadan oluşmaktadır.



**Şekil 6.12.** Kurulması hedeflenen platformun görüntüsü.

Her bir duba 20 adet PZT malzemeye mekanik güç sağlamaktadır. Bu durumda santralin kurulacağı bölgenin dalga karakteristikleri sistem için uygun olmalıdır. Bu durumda Türkiye dalga enerjisi haritasından uygun bölge belirlenir (Bkz.Şekil 6.13). Belirlenen bölgenin dalga enerjisi potansiyeli yüksek olmalıdır. Bu tür sistemden maksimum enerji üretebilmek için yaklaşık dalga boyu 50cm ve üzerinde olmalıdır. Ayrıca dalga periyodu üretilecek enerji miktarını etkileyecektir.

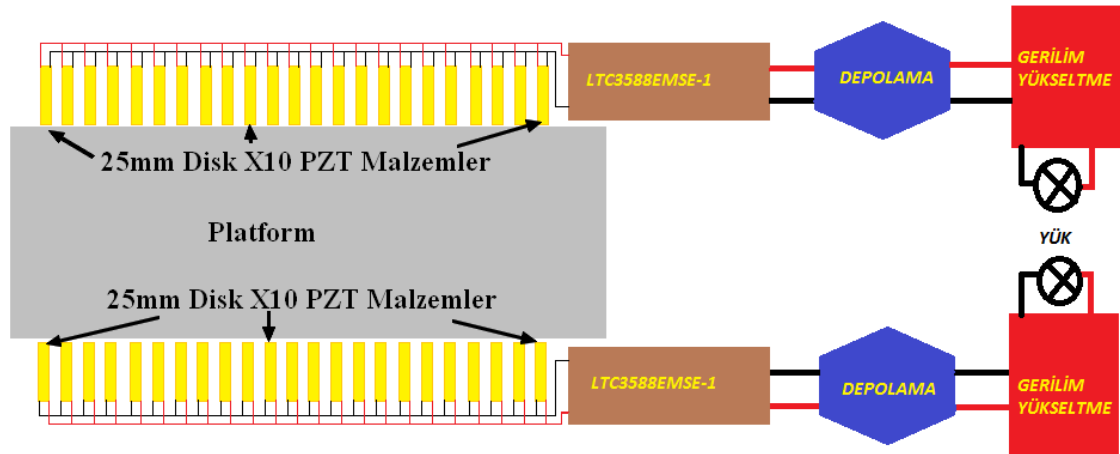


Şekil 6.13. Bölgelerin yıllık ortalama dalga enerjileri kWh/m.yıl (Varol, 2013).

Şekil 6.13.'teki harita incelendiğinde en uygun bölgenin Batı Karadeniz bölgesi olduğu görülmektedir.

Batı Karadeniz verilerine göre bir yılın çoğunluğunda dalga boyu 1,2m'ye varabilmekte ve dalga periyodu 6,09 sn olabilmektedir (Sağlam ve Uyar, 2005).

Dalga boyu ve periyodu kurulacak santral için oldukça uygundur. Dalga enerjisinin taşıdığı enerji ile her bir dubadan maksimum güç üretmek mümkündür. Dalga tepesi anında dubanın üst kısmındaki PZT malzemeler basınç kuvvetine maruz kalırken, alt kısımdaki PZT malzemeler ise gerilme kuvvetine maruz kalır. Bu durumunda çift yönlü enerji üretilmiş olur. Dalga çukuru esnasında ise dubanın üst kısmındaki PZT malzemeler gerilme kuvvetine maruz kalırken alt kısımdaki PZT malzemeler ise basınç kuvvetine maruz kalarak yine çift yönlü enerji üretilmiş olur. Bu durumda enerji sürekliliği sağlanmış olur. Bu şekilde oluşan gerilim LTC3588EMSE -1 enerji harmanlayıcı devresi ile doğrultulur ve akım yükseltilecek kondansatörlerde depolanır. Kullanılacak kondansatör özellikleri ise elektrolitik, 470 $\mu$ F, 450V olması yeterlidir. Kondansatörlerden de akülere aktarılarak depolama işlemi mümkün olan en az kayıplarla giderilmiş olur. Şekil 6.14'te kurulması hedeflenen santralin diyagramı görülmektedir.



Şekil 6.14. Kurulması hedeflenen santralin diyagramı olarak gösterilmesi.

Her bir PZT malzeme 4,6mW gücünde enerji üretmektedir. Bu durumda her bir duba 92 mW enerji üretir. Platformdan toplamda ise 4232mW enerji üretilir. Üretilen enerji depolanarak kullanılabilir.

Sistemin maliyeti ise yaklaşık olarak çizelge 6.5.'te görülmektedir.

**Çizelge 6.5.** Kurulması hedeflenen santralin yaklaşık maliyeti.

<b>Malzeme</b>	<b>Birim Fiyatı/TL</b>	<b>Sistem İçin Kullanılan</b>	<b>Toplam Maliyet/TL</b>
25mm PZT disk	30	920	27.600
LTC3588EMSE-1	28	920	25.760
Kondansatör	10	46	460
Platform	800xm <sup>2</sup>	15m <sup>2</sup>	12.000
Duba	50	46	2.300

Çizelge 6.5.'teki maliyet hesabı tablosuna maliyetleri bilinen malzemeler eklenmiştir. Toplam 68.120 TL bilinen malzemelerin maliyeti görülmektedir. Pistonlar, piston kolları, platformun denize sabitlenecek kısımları ve sabitleme yapıları, işçilik, nakliye gibi maliyetler bu hesaba dâhil değildir. Ayrıca kullanılacak depolama birimi ve elektronik denetleyiciler de eklendiğinde maliyet oldukça artmaktadır. Kurulum maliyetinin yüksek olmasına rağmen üretilen enerji ise oldukça düşüktür. 15m<sup>2</sup> platformdan elde edilen enerjinin 4,232 W olması, bu tür bir santralin kullanılabilir olmasına olanak sağlamamaktadır. Aynı sistemi lineer motorlar kullanılarak tasarlanmış olursa üretilen enerji kW'lar seviyesinde olacaktır. Ayrıca bakım maliyeti bu sistem için yüksek olacaktır. Fakat piezoelektrik malzemelerin özel üretimler olması ve bu sistem için ayrıca PZT malzeme tasarlanması gerektiği unutulmamalıdır. Bu durum sonuçları oldukça değiştirecektir. Yine de istenilen ticari boyutlara ulaşması mümkün olmayacaktır. Ancak piezoelektrik malzemelerin verimlerinin ve güç yoğunluğunun gelecekte artması durumunda bu tür santralleri kurmak elbette mümkün olacaktır.

## 7. SONUÇ

Yapılan çalışmalara göre piezoelektrik malzemelerden kullanılabilir enerji üretmenin mümkün olduğu görülmektedir. Fakat piezoelektrik malzemelerin üretiminin maliyetli olması nedeniyle, bu tip malzemelerin enerji üretmek için kullanılmasını oldukça sınırlandırmaktadır. Bu durum yapılan çalışmalara ve deneylere de yansımaktadır. Deneylerde kullanılan piezoelektrik malzemelerin çoğu enerji üretimi amacı bulundurmamaktadır. Enerji üretim amaçlı piezoelektrik malzemelerin üretimi ancak maliyetlerin oldukça düşmesiyle mümkün olacaktır. Piezoelektrik malzemeler nano teknoloji kullanılarak da üretilebilir. Fakat günümüzde nano teknoloji ile üretim yapmak ta maliyetlidir. Yakın gelecekte bu durum değişeceği öngörülmektedir. Bu durumda yakın gelecekte piezoelektrik malzemeler nano teknoloji ile istenilen güçlerde üretilebilecek ve enerji hasadı ticari boyutlara ulaşabilecektir.

Önemli olan diğer bir nokta ise piezoelektrik malzemeleri Türkiye olarak üretmiyor olmamızdır. Çalışmaların piezoelektrik malzeme üretme noktasında yoğunlaştırılması gerekmektedir. Günümüzde birçok alanda kullanılan piezoelektrik malzemeleri üretmek hem maliyet açısından hem de teknolojinin gerisinde kalmamak açısından oldukça önemlidir.

Birçok yöntemle piezoelektrik malzemelerden enerji üretmek mümkün olmasının yanında dalga enerjisi kullanarak üretim yapmak, üretilecek enerji miktarını maksimum düzeyde tutacaktır. Dalga enerjisindeki güç yoğunluğu bu duruma olanak sağlamaktadır.

Batı Karadeniz örneğine baktığımızda kurulabilecek 15m<sup>2</sup> platform santralin enerji üretimi oldukça düşük ve maliyetin ise oldukça yüksek olacağı öngörülmektedir. Fakat kullanılan PZT enerji üretimi için olmadığından doğru sonuçlar elde edilemeyecektir. Enerji üretimi için yapılacak PZT malzeme tüm sonuçları olumlu yönde ve yüksek oranda değiştirecektir. Dalga enerjisinin yoğunluğu PZT malzemelerden yüksek düzeyde enerji almamıza olanak sağladığı unutulmamalıdır.

Her ne kadar piezoelektrik malzemelerden enerji üretmek maliyetli ve verimi düşük olsa da bu teknolojinin gerisinde kalmamak gerekmektedir. Unutulmamalıdır PV sistemler ilk üretilmeye başlandığında maliyetleri oldukça yüksek verimleri de bir o

kadar düşüktü. Günümüzde ise PV sistemlerin geldiği nokta ortadadır. Aynı durum piezoelektrik malzemeler içinde geçerlidir. Tarihsel gelişimi bu sonucu ortaya çıkarmaktadır.

Piezoelektrik malzemelerin çok çeşitli türlerinin olduğu da unutulmamalıdır. Film türü esnek piezoelektrik malzemeler tasarlanacak uygun sistemlerle yüksek güç yoğunluğu verebilir. Çalışmaların bu durum dikkate alınarak devam etmesi gerekmektedir. Özellikle PZT malzemelerin saflık, kalınlık, alaşımı oluşturan maddeleri ve atom dizilimlerindeki hassaslıkları, sonuçları etkileyen önemli faktörlerdir. Ayrıca yapılacak çalışmalar ve deneyler PZT malzemelerin tamamını kapsayacak şekilde olması gerekmektedir. Özellikle PZT malzemelerin çok dayanıklı olması ve hemen hemen her ortamda çalışabilir olması yapılacak çalışmaların önemini artırmaktadır.

Ülkemizin üç tarafının denizlerle çevrili olması göz ardı edilmemelidir. Çalışmaların dalga enerjisi dönüşüm sistemlerine dayalı olması ülkemiz açısından kazanç sağlayacaktır.

## KAYNAKLAR

- Bak, U., “Dalga Enerjisinden Elektrik Enerjisine Dönüşüm Sistemleri”, Yüksek Lisans Tezi, *İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2003).
- Bulu, A., “Hidroelektrik Santrallerin Tasarım ve Hesap Esasları”. *Okan Üniversitesi Yayınları* İstanbul, 210 (2011).
- 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., “Wave energy in Europe: current status and perspectives”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*,(2002).
- DSİ Genel Müdürlüğü, “Baraj Nedir?”, <http://www.dsi.gov.tr/cocuk/cocuk.html> , (Mayıs, 2016).
- ETAP . “A new Wave of Energy is about to Wash over Europe” Environmental Technologies Action Plan, [http://ec.europa.eu/environment/etap/inaction/pdfs/mar07\\_wave\\_energy.pdf](http://ec.europa.eu/environment/etap/inaction/pdfs/mar07_wave_energy.pdf) ,(Mayıs 2016).
- Haertling, G.H., “Ferroelectric Ceramics: History and Technology”, *Journal of the American Ceramic Society*, 82(4); 797–818 (1999).
- Hagerman, G., and Bedard R., “Guidelines for Preliminary Estimation of Power Production by Offshore Wave Energy Conversion Devices”, *EPRI Report E2I EPRI – WP – US – 001*, December 22 (2003).
- Häsler, E., Stein, L., Harbauer, G.,” Implantable physiological power supply with PVDF film ”, *Ferroelectrics*, 60(1); 277–282 (1984).
- Henderson, R., “Design, simulation, and testing of a novel hydraulic power take-off system for the Pelamis Wave energy converter” *Renewable Energy Ocean Power Delivery*, 271-283 (2006).
- Heywang, W., Lubitz, K., Wersing, W., “Piezoelectricity: Evolution and Future of a Technology”, *Springer Series in Materials Science*, (2008).
- Ivanova, I.A., Bernhoff, H., Ågren O., Leijon M., “Simulated generator for wave energy extraction in deep water”, *Ocean Engineering*,32:1664–1678 (2005).
- Jun, J., Kish, D., Kulaga, J., Lee, Y., Merris, W., Park, S., Zadlo, K., “Alternate Power” *Generator Methodologies.*, 90-61 (1990).
- Kabdaşlı, S., Önöz, B., Yeğen, B., Yılmaz, A., Babaç, G., Varol, Ö.E., Albostan, A., “Türkiye Kıyılarındaki Dalga Enerjisi Potansiyelinin Belirlenmesi - Kumköy Örneği” –, *6. Ulusal Kıyı Mühendisliği Sempozyumu*,İzmir, 445-452 (2007).

### KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Kabdaşlı, S., "Coastal engineering", *World Civil Journal*, 88, 40-47 (1992).
- Liu, J.Q., Fang, H.B., Xu, Z.Y., Mao, X.H., Shen, X.C., Chen, D., Liao, H., Cai, B.C. "A MEMS-based piezoelectric power generator array for vibration energy harvesting", *Microelectronics Journal*, 39(5); 802 – 806 (2008).
- Makki N., "Smart Sensors Actuators and MEMS", *Micro Technologies Europe Symposium*, Czech Republic, 7-8 (2012).
- McCormick, M., "On the use of wind-wave spectral formulas to estimate wave energy resources", *J. of Energy Resour. Tech.*, 120, 314–317 (1998).
- Minazara, E., Vasic, D., Costa, F., Poulin, G., "Piezoelectric diaphragm for vibration energy harvesting", *Proceedings of Ultrasonics International (UI'05) and World Congress on Ultrasonics*, 44 (2006).
- Mohammadi, F., Khan, A., Cass, R.B., "Power Generation from Piezoelectric Lead Zirconate Titanate Fiber Composites", *MRS Proceedings*, 736 (2003).
- Mosonyi, E., "Water Power Development", *High-Head Power Plants. Akademiai Kiado*, II-A 520 (1991).
- Olgun, H., "Küçük Hidroelektrik Santraller". *Tübitak Bilim ve Teknik Dergisi* 42(498): 50-53 (2009).
- Ottman, G., Hofmann, H., Bhatt, A., Lesieutre, G. "Adaptive piezoelectric energy harvesting circuit for wireless remote power supply", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 17(5): 669–676 (2002).
- Pobering, S., Schwesinger, N. "A Novel Hydropower Harvesting Device", *Proceedings of the International Conference on MEMS*, 480–485 (2004).
- Polat, A., "Piezoelektrik materyal kullanılarak deniz dalgasından enerji hasadı yöntemleri", *Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu*, 83-87 Adana, (2015).
- Rodrigues, L., "Wave Power Conversion Systems for Electrical Energy Production", *Nova University of Lisbon* (2005).
- Roundy, S., Wright, P.K. and Rabaey, J. A "study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes", *Computer Communications*, 26(11): 1131–1144 (2003).
- Sağlam, M., Uyar, T. S., "Dalga Enerjisi ve Türkiye'nin Dalga Enerjisi Teknik Potansiyeli", *Elektrik Mühendisleri Odası*, Göztepe (2005).

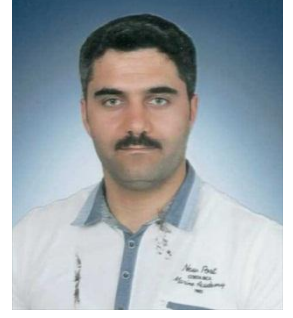
### KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Starner, T. “Human-powered wearable computing”, *IBM Systems Journal*, **35**(3-4): 618-629 (1996).
- Taylor, G., Burns, J., Kammann, S., Powers, W., Welsh, T., “The Energy Harvesting Eel: a small subsurface ocean/river power generator”, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, **26**(4): 539–547 (2001).
- Tüfekçioğlu, E., “Piezoelektrik Malzemelerle Enerji Hasatı”, Doktora Tezi, *Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Seramik Mühendisliği Anabilim Dalı*, Eskişehir (2014).
- Umeda, M., Nakamura, K., Ueha, S. “Energy Storage Characteristics of a Piezo-Generator using Impact Induced Vibration”, *Japanese Journal of Applied Physics*, **36**:3146–3151 (1997).
- Uygun, I., Demirci, R., Saruhan, H., Özkan, A., Belenli, İ., “Batı Karadeniz Bölgesindeki Dalga Enerjisi Potansiyelinin Araştırılması”, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **12** (1), (2006).
- Ün, Ü.T., “Dalga enerjisi teknolojisi, ekonomisi, çevresel etkisi ve dünyadaki durumu”, *Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu Kitapçığı*, **1**: 109-117 (2003).
- Varol, Ö.E., “Düşey Yüzlü Kıyı Yapıları Üzerinde Kullanılabilecek Dalga Enerjisi Dönüştürücüsü Tasarımı”, Doktora Tezi, *İTÜ, Kıyı Bilimleri ve Mühendisliği Anabilim Dalı, Kıyı Bilimleri ve Mühendisliği Programı*, İstanbul (2013).
- Wave Dragon, “Development and validation of technical and economic feasibility of a multi MW Wave Dragon offshore wave energy converter”, [http://www.wavedragon.net/index.php?option=com\\_content&task=view&id=6&Itemid=5](http://www.wavedragon.net/index.php?option=com_content&task=view&id=6&Itemid=5) (Mayıs 2016)
- Yıldız, K., “Hidroelektrik Santrallerin Hesap Esasları ve Projelendirilmesi”. *Devlet Su İşleri Vakfı*, Ankara, **1**: 338 (1992).

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Adem POLAT  
Doğum Yeri ve Tarihi : 15.04.1985 NEVŞEHİR



### Eğitim Durumu

Lisans Öğrenimi : Kocaeli Üniversitesi TEF, Elektrik Öğretmenliği  
Bildiği Yabancı Diller : İngilizce (orta düzey).

### İş Deneyimi

Çalıştığı Kurumlar : Cihangiroğlu Balloons Turizm (2007-2009)  
:Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi MYO Teknisyen (2010 devam etmekte )

### İletişim

Adres :Bilecik Şeyh Edebali Üniv. MYO Makine Atölyesi Binası  
Tel : 0506 228 33 62  
E-Posta : adem.polat@bilecik.edu.tr

### Akademik Çalışmaları

**EVK 2015:** Kambur Balina Yüzgecinden Esinlenerek Tasarlanan Rüzgâr Türbin Kanatlarının Karşılaştırmalı Analizi

**YEKSEM 2015:** Piezoelektrik Materyal Kullanılarak Deniz Dalgasından Enerji Hasadı Yöntemleri

**UEGHEK 2016:** Otoyol Sinyalizasyon Sistemlerinin Enerji Gereksinimlerinin Fotovoltaik-Piezoelektrik Hibrit Sistem İle Karşılanması

**Tarih:20/06/2016**