

**DALGA ENERJİSİNDEN ELEKTRİK ENERJİSİNE
DÖNÜŞÜM SİSTEMLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Müh. Ufuk BAK
508001158

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 24 Aralık 2002
Tezin Savunulduğu Tarih : 8 Ocak 2003

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Abdi KÜKNER
Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Serdar BEJİ (İ.T.Ü)
Prof.Dr. Mesut GÜNER (Y.T.Ü)

OCAK 2003

ÖNSÖZ

Çalışmalarım sırasında benden hiçbir yardımını esirgemeyen, benim vaktimin müsait olmadığı durumlarda hafta sonlarını bana ayıran, gece gündüz ayırd etmeden her karşılaştığım zorlukta bana yardımcı olan sayın Prof. Dr. Abdi KÜKNER'e ve beni her zaman anlayışla karşılayan aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Aralık 2002

Ufuk BAK

İÇİNDEKİLER

ŞEKİL LİSTESİ	v
SEMBOL LİSTESİ	viii
ÖZET	x
ABSTRACT	xi
1. GİRİŞ	1
1. DALGA ENERJİSİNDEN ELETRİK ELDE ETMEDE KULLANILAN TEMEL PRENSİPLER	2
1.1 TAPCHAN (TAPPERED CHANNEL) ENERJİ DÖNÜŞÜM SİSTEMİ	3
1.1.2 TAPCHAN ENERJİ DÖNÜŞÜM SİSTEMİ HAKKINDA YORUMLAR	4
1.2 SALTER’S DUCK ENERJİ DÖNÜŞÜM SİSTEMİ	5
1.3 TAPCHAN VE SALTER’S DUCK ENERJİ DÖNÜŞÜM SİSTEMLERİNİN SORUNLARI	6
1.4 PELAMİS DALGA ENERJİ DÖNÜŞÜM SİSTEMİ	7
1.5 PELAMİS ENERJİ DÖNÜŞÜM SİSTEMLERİNİN SORUNLARI	8
1.6 DALGA POMPASI ENERJİ DÖNÜŞÜM SİSTEMİ	9
1.6.1 ARŞİMED SALINIMLI DALGA ENERJİ DÖNÜŞÜM SİSTEMİ	10
1.6.2 MCCABE DALGA POMPASI ENERJİ DÖNÜŞÜM SİSTEMİ	11
1.6.3 HORTUM POMPASI ENERJİ DÖNÜŞÜM SİSTEMİ	12
1.6.4 DANI MARKALI DALGA ŞAMANDIRASI ENERJİ	

DÖNÜŞÜM SİSTEMİ	13
1.7 ECOFYS ENERJİ DÖNÜŞÜM SİSTEMİ	14
1.7.1 DALGA POMPASI, ECOFYS ENERJİ DÖNÜŞÜM SİSTEMLERİNİN SORUNLARI	15
1.8 DALGA MOTORU ENERJİ DÖNÜŞÜM SİSTEMİ	17
1.9 DALGA MOTORU ENERJİ DÖNÜŞÜM SİSTEMİNİN SORUNLARI	17
1.10 HAREKETLİ SU KOLONU ENERJİ DÖNÜŞÜM SİSTEMİ	18
1.11 KAIMEI ENERJİ DÖNÜŞÜM SİSTEMİ	26
1.12 BÜYÜK BALİNA ENERJİ DÖNÜŞÜM SİSTEMİ	28
1.13 SARKAÇLI ALET	32
2. SABİTLENMEMİŞ HAREKETLİ SU KOLONU	33
3. SABİTLENMİŞ HAREKETLİ SU KOLONU	38
3.2 GÜÇ ÜRETİMİ	43
3.3 MATEMATİKSEL MODELLERİN UYGULAMA ALANLARI	44
4. SONUÇLARIN MARMARA DENİZİ'NE UYARLANMASI	47
5. DALGA ENERJİSİNDEN ELEKTRİK ENERJİSİ ELDE ETMEDE KULLANILAN SİSTEMLERİN KAYIPLARI	52
5.1 SABİTLENMEMİŞ TİTREŞİMLİ SU KOLONU'NUN LİNEER TEORİDE İNCELENMESİ'NİN SONUÇLARI	53
5.2 SABİTLENMİŞ TİTREŞİMLİ SU KOLONU'NUN OPTİMİZASYON TEORİSİ'NE GÖRE ELDE EDİLEN SONUÇLARI	54
5.3 ELEKTROMANYETİK JENERATÖRLERİN TİTREŞİMLİ SU KOLONU İLE BİRLİKTE KULLANIMI	55
8. SONUÇ	58
9. KAYNAKLAR	61

10. Ek A – SPEKTRUMLAR	62
11. EK B – SEYİR VE OŞİNOGRAFI DAİRESİ RAPORU	68
12. EK C – BİLGİSAYAR PROGRAMI	69

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>SAYFA NO.</u>
Şekil 1.1 : Tapchan dalga enerji dönüşüm sistem	3
Şekil 1.1.2 : Bergen yakınlarındaki Tofteshallen’de kurulan Tapchan enerji dönüşüm sistemi	4
Şekil 1.2 : Salter’s Duck enerji dönüşüm sistemi’nin temelini oluşturan “yumurta” ya da onun karaya bağlanmış hali	5
Şekil 1.3.1 : Ocean Power Delivery Ltd’in tasarladığı Pelamis dalga enerji dönüşüm sistemi	7
Şekil 1.3.2 : Pelamis dalga enerji dönüşüm sisteminin deney havuzundaki 1/7 ölçeğindeki prototipinden bir görünüm	7
Şekil 1.6 : Dalga pompası sisteminin çalışma prensibi	9
Şekil 1.6.1.1 : Arşimed Salınlımlı dalga enerji dönüşüm sistemine ait jeneratör	10
Şekil 1.6.1.2 : Portekiz’de çalışacak Arşimed Salınlımlı dalga enerji dönüşüm Sisteminin çekilişi	11
Şekil 1.6.2.1 : McCabe Dalga Pompası enerji dönüşüm sistemi	12
Şekil 1.6.3.1 : Hortum Pompası enerji dönüşüm sistemi	13
Şekil 1.6.4.1 : Danimarkalı Dalga Şamandırası enerji dönüşüm sistemi	14
Şekil 1.7 : Su altındaki su çarkları ve su üstündeki rüzgar gülü ile Ecofys Dönüşüm sistemi	15

Şekil 1.8	: P. Wright'e ait Dalga Motoru enerji dönüşüm sistemi	17
Şekil 1.10.1a	: Dalga tepesi halinde sıkışan havanın üstteki delikten dışarıya Kaçışı	19
Şekil 1.10.1b	: Dalga çukuru halinde alçak basınç oluşan kolona havanın üstteki delikten hava girişi	19
Şekil 1.10.2	: Avustralyalı bilim adamı Tom Dennis ve doktora tezi çerçevesinde tasarladığı hareketli su kolonu enerji dönüşüm sisteminin 1/25 ölçeğindeki modeliyle	21
Şekil 1.10.3	: Wells Türbini'nin çift yönlü çalışan kanatları	21
Şekil 1.10.4	: Saat yönünde dönmekte olan bir Wells Türbini kanadına gelen yüklerle bunlara gelen tepki kuvvetleri	22
Şekil 1.10.5	: Saat yönünün tersine dönmekte olan bir Wells Türbini kanadına gelen yüklerle bunlara gelen tepki kuvvetleri	22
Şekil 1.10.6	: Dalga tepe ve çukurlarıyla birlikte havanın kolona emilmesi ve kolondan basılması ve türbinin dönmesi ile hareketli su kolonunda enerji dönüştürülmesi	23
Şekil 1.10.3a	: Wells Türbini'nin hava kanalında test edilmesi	24
Şekil 1.10.3b	: Wells Türbini'nin hava kanalında test edilmesi	25
Şekil 1.10.4	: Wells Türbini'nin hava kanalındaki davranışının modellenenebilmesi için kullanılan mesh sistemi	25
Şekil 1.11.1	: Kaimei enerji dönüşüm sistemi	26
Şekil 1.11.2	: Bir türbin iki hava odasına birden bağlanıyor	27
Şekil 1.11.3	: 1978-79 yılları arasındaki ilk Kaimei testleri sırasında türbinlerin yerleşimleri	27

Şekil 1.12.1	: Büyük Balina (mighty whale) enerji dönüşüm sisteminin prototipi suya indirilmek üzere	28
Şekil 1.12.2	: Büyük Balina (mighty whale) enerji dönüşüm sistemi prototipi suyun içinde	29
Şekil 1.12.3	: Büyük Balina (mighty whale) enerji dönüşüm sistemine ait prototipin genel boyutları ve genel yerleşimi	30
Şekil 1.12.4	: Büyük Balina (mighty whale) enerji dönüşüm sistemi prototipine ait bir Wells Türbini	31
Şekil 1.10.5	: Büyük Balina (mighty whale) enerji dönüşüm sisteminin prototipine ait bir jeneratör	31
Şekil 1.13.1	: Sarkaçlı Alet enerji dönüşüm sisteminin temel prensibi	32
Şekil 2.1	: Yüzen titreşimli su kolonu	33
Şekil 3.1	: Deniz dibine sabitlenmiş hareketli su kolonu	38
Şekil 4.1	: Kolonun su altında kalan boyu L ile kolon çapı D 'nin değişimi	48
Şekil 4.2	: Kolon çapı D 'nin değişmesiyle ortaya çıkan güçler	49
Şekil 4.3	: Tepki fonksiyonu H_w 'nin değişimi	50
Şekil 4.4	: Derinlik etkisini de içeren spektrum S_h 'nin değişimi	50
Şekil 4.5	: Etkin direncin değişimi	51
Şekil 5.1.1	: Merkez eksenli yatay olarak yerleştirilmiş bir türbinin hareketli su kolonunda kullanılması	55
Şekil 5.1.2	: Bir alternatörün temel çalışma prensibi	56

SEMBOL LİSTESİ

Φ	: Havanın hız potansiyeli
P	: Bir noktadaki basınç değeri ($\text{kg} \times \text{sn}^{-2} \times \text{m}^{-1}$)
ρ	: Suyun yoğunluğu ($\text{kg} \times \text{m}^3$)
g	: Yerçekimi ivmesi ($\text{m} \times \text{sn}^{-2}$)
z	: Düşey yöndeki yer değişimi miktarı (m)
t	: Zaman (sn)
$f(t)$	: Bernoulli Sabiti
W	: Enerji ($\text{m} \times \text{kg}^{-1}$)
w_a	: Havanın ağırlığı (kg)
S_3	: Çıkıştaki havanın ilk konumuna göre düşeydeki yer değişimi (m)
h_s	: Bakınız Şekil 2.1 (m)
Z_b	: Kolonun düşey yöndeki yer değişimi (m)
A_1	: Alan (Bakınız Şekil 2.1) (m^2)
A_3	: Alan (Bakınız Şekil 2.1) (m^2)
ξ	: Serbest su yüzeyine bağlı eğrisel koordinat sistemi (m)
L_t	: Türbini içinde bulunduran borunun uzunluğu (m)

δ : Türbülansa bağlı sönüm katsayısı ($\text{sn}^2 \times \text{m}^{-1}$)

r_1 : Kolonun yarıçapı (m)

$\bar{V}$: Ortalam hava çıkış hızı ($\text{m} \times \text{sn}^{-1}$)

m : Kütle (kg)

a : Ek su kütlesi (kg)

b_c : Boyutsuz sönüm kuvveti katsayısı

c : Geri getirme katsayısı

$F(t)$: Sistemi salınıma zorlayan kuvvet

k : Dalga sayısı

h : Sistemin bulunduğu bölgedeki su derinliği (m)

$S_F(\omega)$: Kuvvet fonksiyonunun spektral yoğunluğu

$\eta(t)$: Suyun yüzeyinin zamana göre düşey doğrultudaki yer değıştirme miktarı (m)

D : Kolon çapı (m)

DALGA ENERJİSİNDEN ELEKTRİK ENERJİSİNE DÖNÜŞÜM SİSTEMLERİ

ÖZET

Bu çalışmanın ilk bölümünde farklı dalga enerjisi dönüşüm sistemleri üzerinde durulacaktır. İkinci ve üçüncü bölümlerde ise bu sistemler içinde en çok verim elde edilen olarak düşünülen titreşimli su kolonu (OWC – Oscillating Water Column) için iki farklı teorik çalışma yapılmıştır. İkinci bölümde yer alan teoride doğrudan kolon içinde sıkışan hava incelenmektedir. Bu matematiksel anlamda iki nokta arasındaki basınç farkı olarak ortaya çıkmakta ve Bernoulli Denklemi ile ifade edilmektedir. Üçüncü bölümde incelenen Optimizasyon Teorisi’nde ise zorlanmış bir hareket yapan bir sistemin genel denklemi yazılmakta ve sönüm katsayısının bileşenleri açıklanıp bunların oluşturduğu dirençler üzerinde durularak sonuca varılmağa çalışılmaktadır. Dördüncü bölümde ise üçüncü bölümde yer alan optimizasyon teorisi Marmara Denizi’ne uyarlanmıştır. Sonuç bölümünde Marmara Denizi için yapılacak bir projede teorilerde nelerin düzeltilmesi gerektiği ve kurulacak sistemin beklenen kayıplarının nerelerde olduğu açıklanmıştır.

CONVERSION SYSTEMS FROM WAVE ENERGY TO ELECTRICAL ENERGY

SUMMARY

The first part of this study describes different wave energy conversion systems. Two different theoretical approaches are employed for the oscillating water column (OWC) which is considered to be the most efficient wave energy conversion system. In the second part of the thesis the pressed air in a column is studied. Mathematically this is described by a difference in pressure and expressed as a Bernoulli equation. In the third part, first the general equations of motion of a system subject to forced oscillation is derived and then the components of the damping coefficient are investigated by using optimization theory. In the fourth part the optimization theory developed in the previous part is applied to the Sea of Marmara. The conclusions describe the modifications needed for the wave energy conversion system to be employed in the Sea of Marmara and also the expected losses in the system.

GİRİŞ

Günümüzde fosil enerji kaynaklarına alternatif enerji kaynakları arayışı hızlanmıştır. Bu arayışa dalga enerjisinden elektrik elde etmede kullanılan sistemler de dahil edilmişler, farklı sistemler denenmiştir. Ancak bundan dalga enerjisinden elektrik elde etme fikrinin yeni olduğu anlaşılmamalıdır. 20. YY'ın başlarından itibaren farklı prensiplere dayalı fikirler üretilmiş, patentleri alınmıştır. Ancak bu fikirler zaman zaman ortaya atılmış ve 1945 yılına kadar pek ilgi görmemiş. 1945 yılında Japon bilim adamı Masuda'nın su tankından ilk titreşimli su kolonunu deneysel olarak incelemesinden sonra konu ilgi görmeye başlamış birkaç yıl boyunca birçok araştırmacının konuyla ilgilenmesine neden olmuştur. 1960'lı yıllarda popülaritesini yitiren dalga enerjisinden elektrik elde etmede kullanılabilecek dönüşüm sistemleri petrol krizinden sonra yeniden araştırmacıların ilgisini çekmeye başlamış. Nihayet 1980'lerin ikinci yarısından itibaren bazı prototipler yapılmış, farklı sistemler denenmişlerdir.

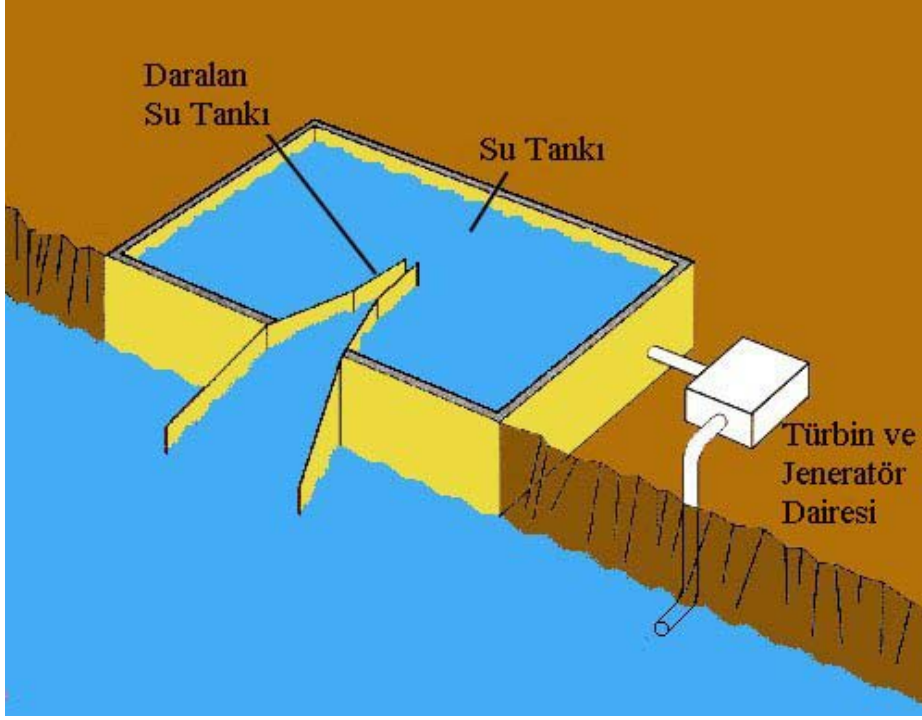
Dalga enerjisinden elektrik elde eden sistemlerin teorik çözümleri genelde çok değişkenli ve doğal şartların tam anlamıyla belirlenememesi nedeniyle zordur. 134 Uygulanacak teorilerin sağlıklı olmaları için uzun süreli ölçümlerden çıkan ortalama dalga periyodu, dalga yüksekliği, su derinliği gibi verilerin açıklanması gerekmektedir. Daha hassas sonuçların elde edilebilmesi için teorilerde üç boyutlu hız potansiyelleri ve viskoz direnç gibi bileşenler ihmal edilmemelidirler. Teoriler genelde sistemin doğal frekansı ile dalga frekansını eşitlemek suretiyle sistemi bir rezonansa bindirip bir maksimum enerji elde etmektedirler. Bu durumun pek fazla meydana gelmediği düşünülerek elde edilen gücün belli bir katsayıyla, örneğin Marmara Denizi için 2/3 gibi, çarpılması düşünülmelidir. Ancak bunun yerine geniş bantlı, düşük maksimum değerlere sahip dalga enerji spektrumlarının kullanılmasının düşünülmesi daha sağlıklı olacaktır. 229 Sistemlerin kurulumunda derin su kabulü gereği dalga boyunun yarısı kadar bir derinlikte dalga hızının sıfıra eşit olacağını göz önünde bulundurmak gerekir.

1. DALGA ENERJİSİNDEN ELEKTRİK ELDE ETMEDE KULLANILAN TEMEL PRENSİPLER

Dalga enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren birçok sistem olmasına karşın, bunların birtakım ortak yönleri bulunabilmektedir. Dalga enerjisi önce mekanik enerjiye daha sonrada mekanik enerji elektrik enerjisine dönüştürülür. Bu da birçok patent ve sisteme temel oluşturmuştur. Bunun yanında yüksek teknoloji ürünü olan piezo elektrik kristallerden oluşan bir halıyı deniz yüzeyinde yüzecek şekilde şamandıralarla bağlamak da düşünülen sistemler arasındadır. Ancak bu son derece pahalı ve piezo elektrik kristallerin verimleri açısından son derece iyi düşünülmesi gereken bir sistemdir. Bu fikir dışında en ilkel dönüşüm sisteminden en karmaşık sisteme kadar inceleyeceğimiz her sistem dalga enerjisini hareket enerjisine dönüştürme prensibi ile çalıştığı kabul edilmektedir.

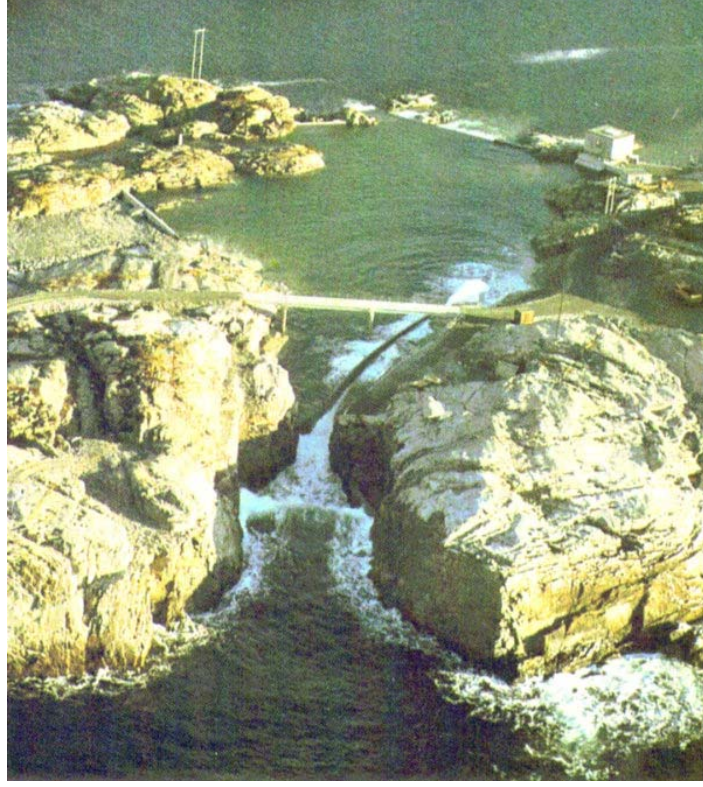
1.1 TAPCHAN (TAPPERED CHANNEL) ENERJİ DÖNÜŞÜM SİSTEMİ

Tapchan Norveç'te uzun yıllar başarılı ve verimli bir şekilde kullanılmış ve kendini kanıtlamış bir enerji dönüşüm sistemidir. Bu sistem yoğun ve büyük dalgalarla çalışmaktadır. Sistemin kendisi karada deniz seviyesinden 3 metre yüksekteki bir yerde kurulan bir su tankından ve bu su tankına bağlı bir "boru" veya "kanaldan" oluşmaktadır. "Boru" veya "kanal" içinde bir türbin bulunur ve bir ucu su tankına bağlı iken diğer ucu denize bakar ya da deniz seviyesine kadar iner. Su tankına 6-7 metre derinlikte, 60 metre genişliğinde başlayıp 3 metre yükseklikteki tank seviyesinde geldiğinde 20 santime kadar daralan bir kanal gelir. Kanal düzgün doğrusal bir formda daralır. Sistemin çalışma şeklinin daha iyi anlaşılabilmesi için "Şekil 1.1"de şematik bir gösterime yer verilmektedir. Norveç'te Bergen yakınlarındaki Tofteshallen'de kurulup başarılı bulunan sistemin resmi ise "Şekil 1.1"de verilmektedir.



Şekil 1.1 Tapchan Dalga Enerji Dönüşüm Sistemi

Dalga kanalın geniş ucuna gelir ve hareket yönü gereği biraz yükselerek daralan kanal girer ve bundan dolayı da dalgayı oluşturan su hacmi daralır ve sahip olduğu kinetik enerjinin bir kısmı potansiyel enerjiye dönüşür. Bir başka deyişle dalgayı oluşturan suyun bir bölümü kanal içinde yukarıya taşınır. Kanalın diğer ucu ise su tankına bağlı olduğu için yükselen su bu tanka akar. Tank deniz seviyesinden yüksekte bulunduğundan dolayı tanktaki su potansiyel enerjiye sahiptir. Diğer tarafta tanka bağlı bulunan borunun içinde negatif bir basınç veya kuvvet olmadığı için su zerrecikleri bu borudan aşağıya, deniz seviyesine inmek, fazla potansiyel enerjilerini vermek isterler. Boru içinde akan su zerrecikleri yine boru içinde yer alan ve tek bir yönde dönmesine izin verilen bir türbini döndürürler. Yani su zerreciklerinin potansiyel enerjisi türbinde kinetik enerjiye, diğer bir deyimle hareket enerjisine dönüştürmüş olur. Türbin bir jeneratöre bağlandığı takdirde hareket enerjisinden elektrik elde edilebilir.



Şekil 1.1.2 Bergen yakınlarındaki Tofteshallen’de kurulan Tapchan Enerji Dönüşüm Sistemi

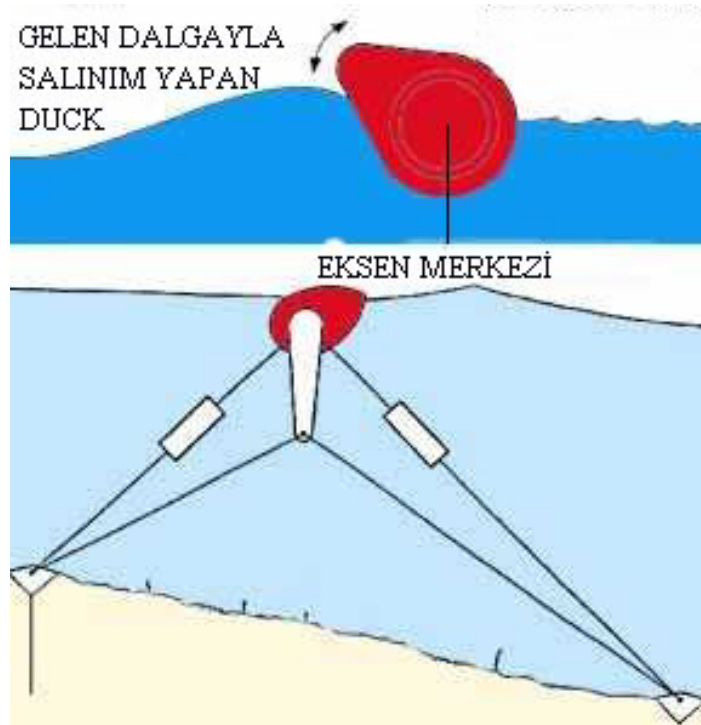
1.1.2 TAPCHAN ENERJİ DÖNÜŞÜM SİSTEMİ HAKKINDA YORUMLAR

Bu sistemin en temel avantajı hiç şüphesiz ki asıl enerji dönüştürücü sistemleri oluşturan türbin ve jeneratörün açık deniz şartlarına maruz kalmamalarıdır. Sistemin çalışma prensibi gereği suyun akışını hareket enerjisine dönüştürme görevini yerine getiren türbin tek yönde dönecek şekilde tasarlanır. Bu sistemin enerji dönüştürücü cihazlarının bir hidroelektrik santral ile tamamıyla aynı prensiplere dayanabileceği anlamına gelmektedir. Hidroelektrik santrallerin bütün dünyada kullanıldığı, bu konuda birçok tecrübeler edinildiği dikkate alındığında bu bir avantaj olmaktadır. Norveç’teki prototipin işlevini yitirmiş olmasının sebebi ise üretici firmanın sistemin geliştirilmesi konusunda beklenen ilgiyi göstermemesi ve bunun neticesi olarak sistemin bakım tutumlarını askıya alarak yatırımını durdurması olarak açıklanabilir. Şiddetli yağmurlar toprak kaymalarına sebep olmuş ve tankı kısmen toprak doldurmuştur. Ayrıca denizden taşınan bazı taş ve kayalar zamanla hem tankın içine gelmiş hem kanala gelerek kanalın oldukça büyük hasarlar görmesine sebep olmuşlardır. Özellikle kanal hasar gördükten sonra sistem enerji

dönüşümü yapamaz hale gelmiştir. Sistemin kritik parçaları olan jeneratör ve türbinde ise bir sorun çıkmamıştır.

1.2 SALTER’S DUCK ENERJİ DÖNÜŞÜM SİSTEMİ

Salter’ın 1970’lerde ortaya attığı düşünceden hareketle enerji dönüşüm sistemi ile dalgakıran fikrinin birleştirilebileceğini ve böylece tek bir sistemle iki ayrı etki elde edilebileceğini ortaya koymuştur. Bu sistemde dalga enerjisi suyun içinde yer alan ve yumurtaya benzeyen bir forma çarparak onu kendi eksenini etrafında döndürmeye çalışır. “Şekil 1.2”. Bu ekseninden geçirilen bir şaft bir türbini harekete geçirir. Türbine bağlanan bir jeneratör ile elektrik elde etmek mümkün olabilmektedir. İstenirse aynı şafta birden fazla yumurtaya benzeyen duck sisteminden bağlanabilir. Enerjisinin bir kısmını “duck”ı döndürmek için kullanmak zorunda kalan dalga “duck”ın arkasında eski şiddetinden önemli bir bölümünü kaybetmiş olarak devam ederken sistem hem jeneratöre iletilen hareket ile elektrik üretmiş, hem de şiddetini yitiren dalga sebebiyle dalgakıran olarak işlevini yerine getirmiş olur.



Şekil 1.2 Salter's Duck Enerji Dönüşüm Sistemi'nin temelini oluşturan “yumurta” ve onun karaya bağlanmış hali

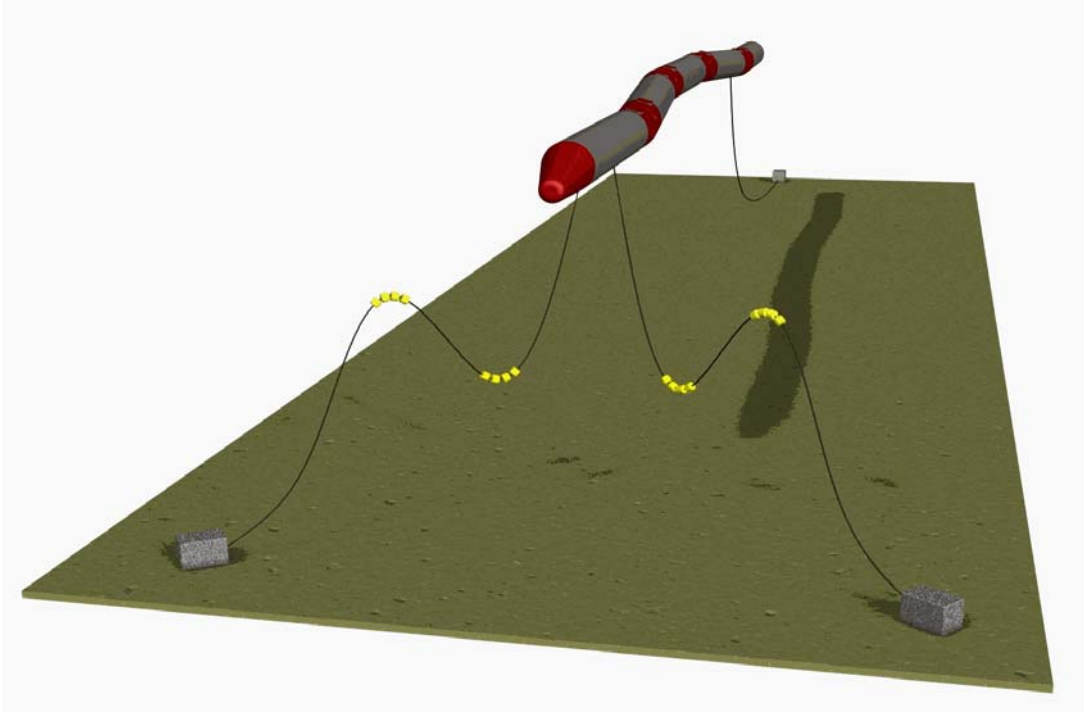
1.3 TAPCHAN VE SALTER’S DUCK ENERJİ DÖNÜŞÜM SİSTEMLERİNİN SORUNLARI

Bölüm 1.1’de tanıtılan Tapchan Enerji Dönüşüm Sistemi’ndeki su tankı deniz seviyesinin üstünde olmasından dolayı bazı sorunları yaratmaktadır. Bu yüzden deniz suyunun tanka gelebilmesi için dalganın genliğinin yüksek olmasını gerektirir. Bölüm 1.2’de tanıtılan Salter Duck Enerji Dönüşüm Sistemi’nin sorunları arasında ise farklı bir geometrik yapıya sahip olan oval şeklindeki yüzer cisim kullanılacağı bölgeye göre en verimli şekilde dizayn etmek sayılabilir. Bunun yanında bu sistemde farklı yönlerde farklı kuvvet bileşenlerine maruz kalacak olan şaftın şeklinin kısa zamanda değişip sisteminin verimini olumsuz yönde etkilemesi de diğer bir sorun olarak eklenebilir. Bu sorunların yanında sistemleri ekonomik açıdan “verimsiz” kategorisine sokabilecek en büyük ortak durum ise, sistemin en pahalı ve hassas ünitesi olan türbinin her iki sistemde de çok korozyon olan deniz suyuyla doğrudan temasta bulunmasıdır. O halde akla gelebilecek ilk şey, pahalı ve hassa üniteleri kapalı bir kutu içinde toplayıp deniz suyundan yalıtımdır. Buna verilecek en güzel örneklerden biri Pelamis Enerji Dönüşüm Sistemidir.

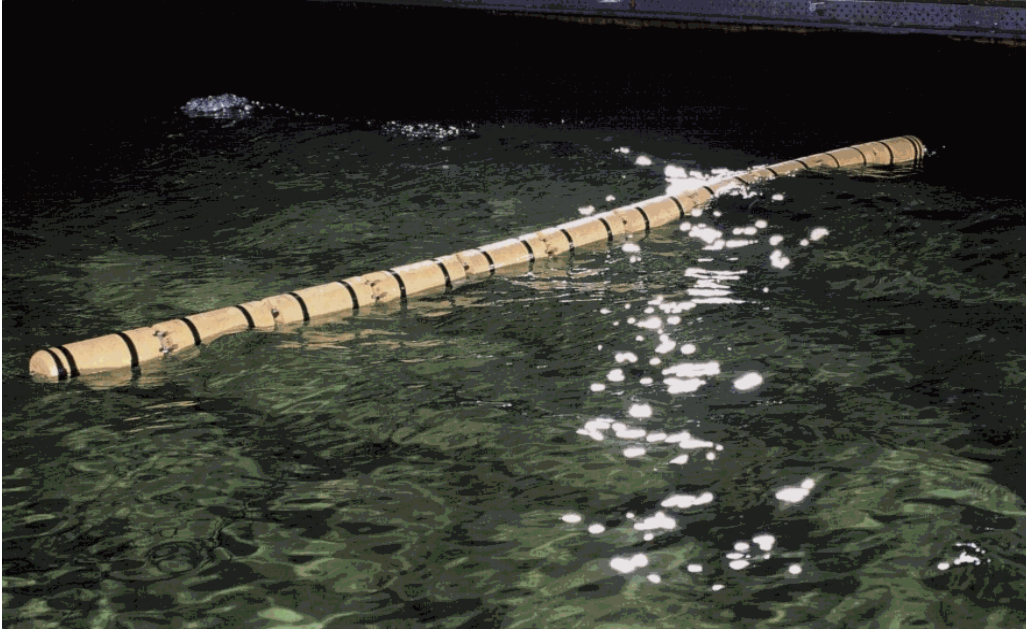
1.4 PELAMİS DALGA ENERJİ DÖNÜŞÜM SİSTEMİ

Bir deniz yılanı cinsi olan “pelamis” adının bu sisteme verilmesinin sebebi hiç şüphe yok ki sistemin şeklinden kaynaklanmaktadır. Sistem herbiri su üstünde kalan silindirik şamandıraların hareket edebilecek şekilde birbirlerine bağlanmasından oluşur. Sistem deniz yüzeyine yerleştirilirken yer değiştirmesini önlemek için bazı noktalardan genellikle deniz dibine 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. Jeneratörüne bağlı bu pompa jeneratörün çalışmasıyla elektrik üretimine neden olur. Üretilen elektrik deniz dibinden geçirilen kablolarla karaya taşınır. “Şekil 1.3.1” Pelamis Dalga Enerji Dönüşüm Sistemi’ni göstermektedir. Bu sistem “Ocean Power Delivery Ltd” şirketinin bir patenti olup özellikle açık deniz yapılarında kullanım için ideal bir sistemi oluşturabilir. Şirket 130 m uzunluğunda, 3,5 m genişliğinde silindirler kullanarak sistemden uygun şartlarda düzenli

olarak 0.75 Mwatt enerji elde etmeyi planlamaktadır. Sistemin deneyleri 1/7 ölçeğindeki prototiple “Şekil 1.3.2” yapılmaktadır.



Şekil 1.3.1 Ocean Power Delivery Ltd’in tasarladığı Pelamis Dalga Enerji Dönüşüm Sistemi



Şekil 1.3.2 Pelamis Dalga Enerji Dönüşüm Sistemi’nin deney havuzundaki 1/7 ölçeğindeki prototipinden bir görünüm.

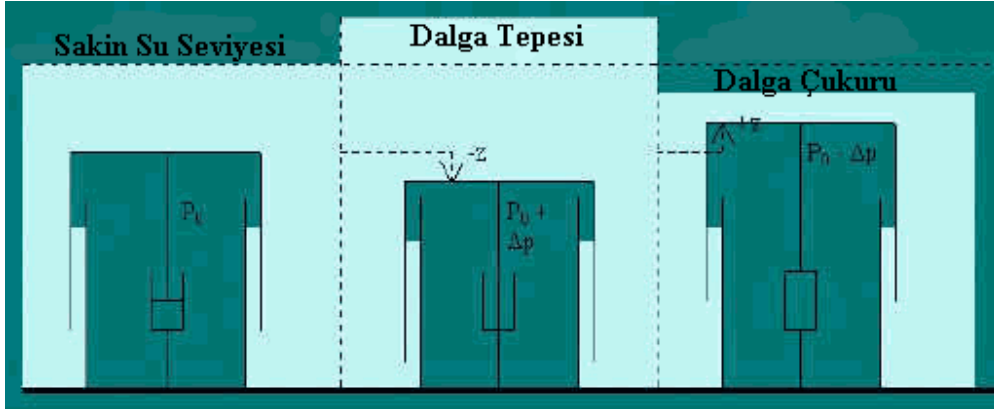
1.5 PELAMİS ENERJİ DÖNÜŞÜM SİSTEMLERİNİN SORUNLARI

Bölüm 1.4’de tanıtılan Pelamis Dalga Enerji Dönüşüm Sistemi’nin sorunları arasında şüphesiz deniz dibinden geçirilecek enerji nakil hatlarının ilk inşaat ve bakım tutum giderlerinin yüksek olmasıdır. Bu nedenle bu sistem ilk etapta açık denizde operasyon yapan platformların etrafında konuşlandırılıp yine bu sistemlerin enerji açıklarını kapatmakta kullanılabilecektir. Sistemin kritik bir noktasını hareketli silindirler arasındaki esnek bağlar oluşturmaktadır. Bu bağların elastisitelerini zamanla kaybetmeleri ve hatta yırtılmaları halinde sistemin içinde yer alan hidrolik yağı işlevini yerine getiremeyecek, sistem belki bir verim kaybı, belki de tamamen devre dışı kalabilecektir. Bu sistemde 1.1 ve 1.2 bölümlerinde tanıtılan sistemlerin en büyük sorununu teşkil eden, elektriği üreten asıl parça olan jeneratör, suyla doğrudan temasta değildir. Ancak içine kapatıldığı sistemin kaynak dikişlerinin ve diğer bağlantılarının ufak bir açılma göstermeleri halinde jeneratör deniz suyuyla doğrudan temas edecek ve çok kısa bir sürede korozyona uğrayabilecektir. Bir başka problemi ise sistemin boyutları oluşturmaktadır. Şirketin düşündüğü 130 m uzunluk sisteme aynı anda çok farklı dalga yüklerinin farklı yönlerde ve şiddetlerle etkimesine neden olacaktır. Bu yükler bir yandan yukarıda değinildiği gibi esnek bağları zorlayacağı gibi sistemi dibe sabitlemede kullanılan halatların ani yüklerle gerilmelerine ve yıpranmalarına sebep olacaktır. Bu nedenle dibe bağlı halatlar doğrudan sisteme bağlanmak yerine hareketli makaralara, makaralar ise sistemin kendisine bağlanmalıdır. Deniz suyunun çok korozif olduğu ve makaraların ömürlerinin en iyi şartlarda 3 ila 5 yılla sınırlı olacağı düşünüldüğü takdirde makaraları mümkün olduğunca su yüzeyine yakın tutmanın faydası anlaşılmaktadır. Bu sayede makaraları değiştirmek kolaylaşacaktır.

1.6 DALGA POMPASI ENERJİ DÖNÜŞÜM SİSTEMİ

Bu sistem denizin içinde çalışması için düşünülen bir sistemdir. Deniz içinde ya da dibindeki yapının üst kısmında hareketli bir bölüm mevcuttur. Bu bölüm kendinden yüzme yeteneğine sahip bir şamandıraya sahiptir. Sistemi lineer bir sistem şeklinde düşünmek gerekmektedir. Sistemin bulunduğu noktanın üzerine gelen dalga tepesi sistemin şamandırasını aşağıya doğru iterken aynı şamandıra altta yer alan ve sıkışan su

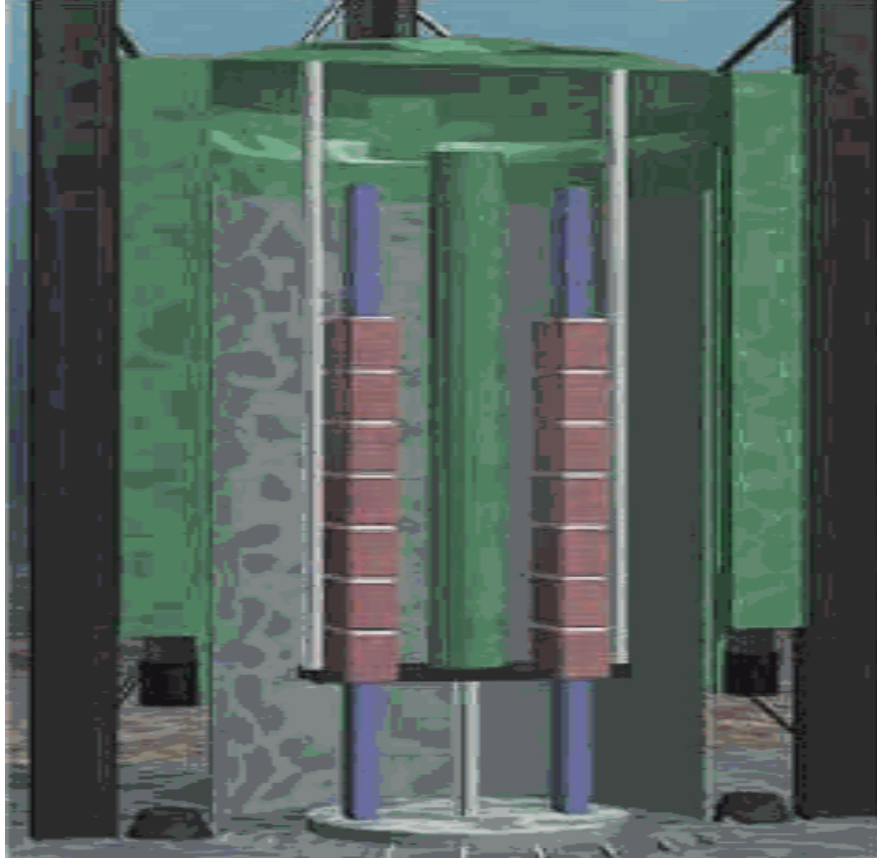
nedeniyle yukarı itilir [3]. Sistem dalga tepesi yerine dalga çukuruna geldiğinde şamandırası bu sefer yukarı hareket eder. “Şekil 1.6”da bu sistemin temel çalışma prensibi görülmektedir. Sistem bünyesinde yer alan jeneratör elektrik üretir ve dipten yapılan kablo bağlantısı ile elektrik karaya verilir. Karada düzensiz olarak üretilen doğru akım düzenli frekansa sahip alternatif akıma dönüştürülerek kullanılabilir.



Şekil 1.6 Dalga Pompası Sisteminin Çalışma Prensibi

1.6.1 ARŞİMED SALINIMLI DALGA ENERJİ DÖNÜŞÜM SİSTEMİ

Arşimed Salınlımlı Dalga Enerji Dönüşüm Sistemi kısaca AWS (Archimedes Wave Spring) olarak yazılan temeli “dalga pompası” sistemine dayanan bir sistemdir. Ancak klasik dalga pompası sisteminin klasik sorunları arasında olan “hantal yaylanma” bu sistemde kısmen çözülmüştür. Sistemin çalışma prensibi “Şekil 1.6”daki ile aynıdır. Ancak “Şekil 1.6”da bir yay olarak gösterilen yapıdaki fark nedeniyle sistem daha etkin olmaktadır. Sistem tamamen kapalıdır. Şamandıranın altında hava bulunmaktadır. “Şekil 1.6”da yay olarak görülen yerde bir nitrojen gazı ile havadan oluşan hidro-pnömatik bir yay vardır. Bu yayın çevresinde lineer olarak yerleştirilmiş miktarıslardan oluşan iki adet çubuk vardır. “Şekil 1.6.1” Bunlar jeneratörü oluşturur.



Şekil 1.6.1.1 Arşimed Salınlımlı Dalgı Enerji Dönüşüm Sistemi'ne ait jeneratör

Sistemin en etkin olduğu anlar

- Sistemin doğal frekansının gelen dalğanın frekansına eşit olduğu
- Sistemin yay katsayısı ile dalğanın sönüm katsayısı eşit olduğu

anlardır. “Şekil 1.6”daki yay bu sistemde bir gazdan oluştuğuna göre kullanılacak gazın yoğunluğu ile sistemin doğal frekansını kontrol edebilme ve böylece sistemi kullanılacak bölgeye en uygun şekilde yapma imkanı doğmaktadır. Sistem istenildiğinde batırılabilen bir punton üzerine inşaa edilmiştir. Bu sayede bir yerden başka bir yere nakil işlemi kolayca yapılabilmektedir. “Şekil 1.6.2” Portekiz’de çalışacak bir prototipin bir romorkör tarafından çalışacağı bölgeye çekilişini göstermektedir.

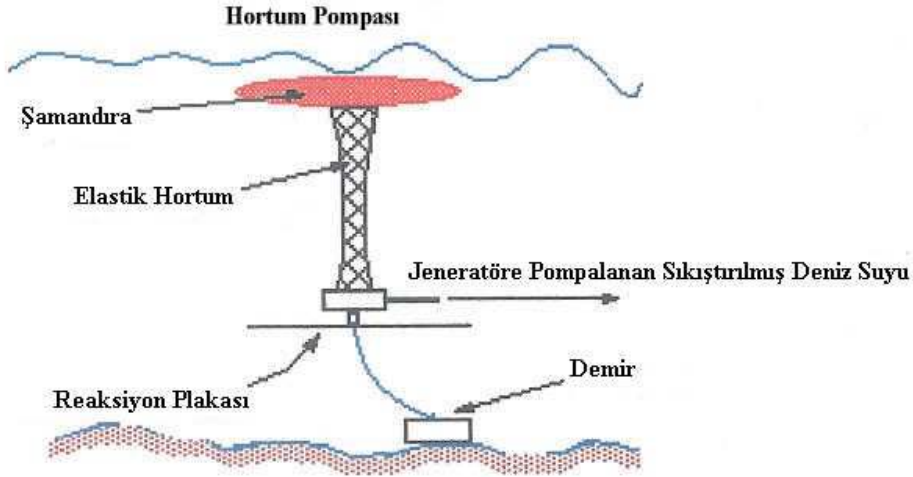


Şekil 1.6.1.2 Portekizde Çalışacak Arşimed Salınlı Dalgı Enerji Dönüşüm Sistemi'nin çekilişı

1.6.2 MCCABE DALGA POMPASI ENERJİ DÖNÜŞÜM SİSTEMİ

McCabe Dalga Pompası enerji dönüşüm Sistemi baş, merkezi ve kık ponton olmak üzere üç adet prizmatik çelik pontondan oluşmaktadır. Bunlar birbirlerine menteşelerle bağlanmakta ve gelen dalgalarla birlikte hareket etmektedirler. Sistem temelde merkezi pontona bağlı olan sönüm plakasının sistemi mümkün olduğunca yerçekimi doğrultusunda tutmasına ve baş ve kık pontonların hareket etmelerine dayanmaktadır. Baş ve kık pontonlar hareket ettikçe merkezi pontonlarla menteşeler arasında monte edilmiş olan lineer hidrolik pompalara hareket iletmektedirler. Pompalara birer jeneratör bağlanması halinde hareket enerjisi elektrik enerjisine dönüştürülebilmektedir. “Şekil 1.6.2.1”de McCabe Dalga Pompası Enerji Dönüşüm Sistemi görülmektedir.

miktarının nisbeten daha düzenli olacağı düşünülmektedir. “Şekil 1.6.3.1”de bir hortum pompası enerji dönüşüm sistemi gösterilmektedir.

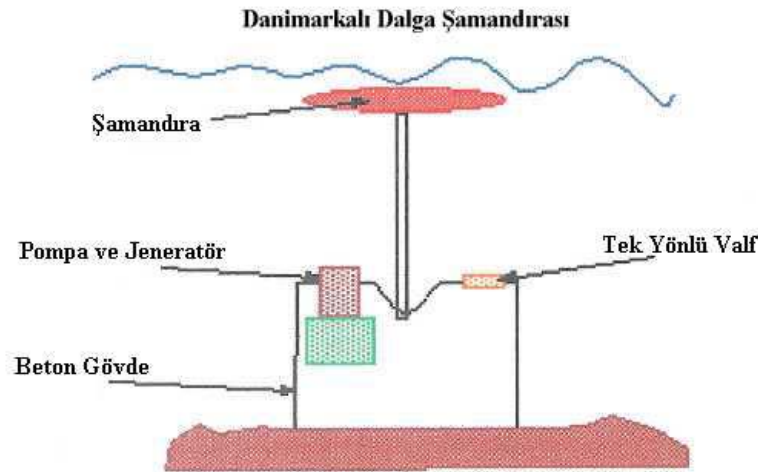


Şekil 1.6.3.1 Hortum Pompası Enerji Dönüşüm Sistemi

1.6.4 DANİMARKALI DALGA ŞAMANDIRASI ENERJİ DÖNÜŞÜM SİSTEMİ

Danimarkalı Dalga Şamandırası Enerji Dönüşüm Sistemi en basit dalga pompası sistemlerinden biridir. Sistemin gövdesi deniz dibine bağlanır ve denize iki açıklık bırakılmaktadır. Bu açıklıklardan biri sisteme deniz suyu girişi, diğeri sistemden su çıkışı olmaktadır. Girişe bir tek yönlü valf yerleştirilirken sistem çıkışına bir türbin yerleştirilmektedir. Türbin bir jeneratöre bağlanmaktadır. Sistemin içine giren suyun türbine “basılması” için gerekli enerji ise bir “pistonun basılması” ile elde edilmektedir. Söz konusu “piston” hareketi dalga tepe ya da çukuruna göre yukarıya veya aşağıya hareket eden şamandıranın hareketinden başka birşey değildir. Dalga tepesi esnasında yukarıya çıkan şamandıra sistem bünyesinde bir alçak basınç oluşturarak tek yönlü valfin açılmasına ve sistemin bünyesine deniz suyu girmesine neden olmaktadır. Dalga çukuru esnasında ise aşağıya inen şamandıra sistemin bünyesindeki suyu dışarı itmeye çalışmaktadır. Bu noktada girişe bağlı tek yönlü valf devreye girmekte ve girişi kapatmaktadır. Sistemin kalan tek açık noktası olan çıkıştan dışarıya “basılan” deniz suyu çıkışta yer alan türbini çevirmektedir. Türbin döndüğü için kendisine bağlı olan

jeneratöre hareket iletmekte ve elektrik enerjisi üretimine neden olmaktadır. “Şekil 1.6.4.1”de Danimarkalı Dalga Şamandırası Enerji Dönüşüm Sistemi görülmektedir.



Şekil 1.6.4.1 Danimarkalı Dalga Şamandırası Enerji Dönüşüm Sistemi

1.7 ECOFYS ENERJİ DÖNÜŞÜM SİSTEMİ

Ecofys Enerji Dönüşüm Sistemi’nin bugüne kadar üç adet havuz deneyi yapılmış ve bunların başarılı oldukları görülmüştür. Sistem hem rüzgar enerjisini, hem de dalgaların itici gücünden faydalanma mantığıyla tasarlanmaktadır. Sistem bir merkeze sahiptir. Bu merkezin çapı geniş tutulur ve içinde bir jeneratör barındırır. Sistem dibe sabitlenir. Sistemin dibe ve yukarıya uzanan merkezden uzaklaştıkça incelen bölümlerine su çarkları ve rüzgar gülleri yerleştirilir. Çarklardan ve rüzgar gülünden gelen hareket jeneratöre iletilir ve enerji elde edilir. Sistem genel olarak “Şekil 1.7”de görülmektedir.



Şekil 1.7 Su altındaki su çarkları ve su üstündeki rüzgar gülü ile Ecofys Enerji Dönüşüm Sistemi

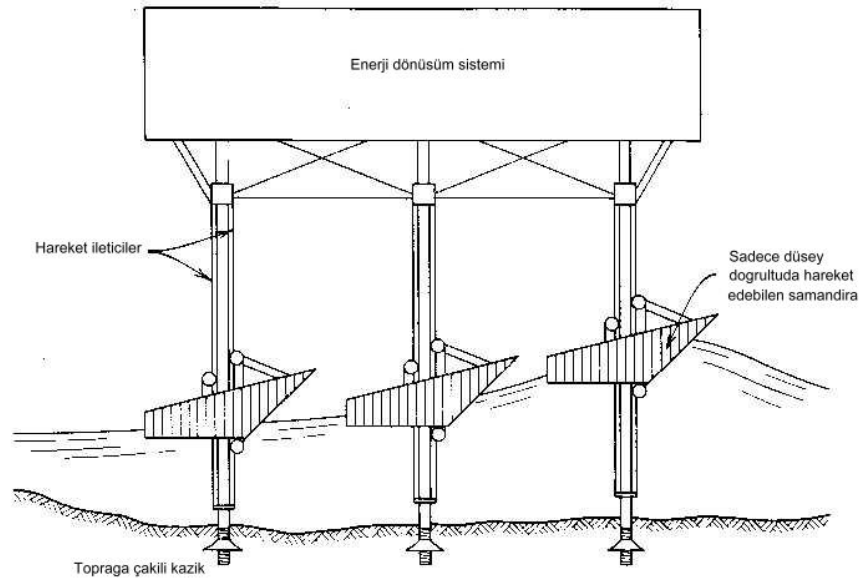
1.7 DALGA POMPASI, ECOFYS ENERJİ DÖNÜŞÜM SİSTEMLERİNİN SORUNLARI

1.6 bölümünde tanıtılan dalga pompası sistemin en önemli sorunlarından biri sistemin şamandırasının yeterince hızlı olmaması iken bu sorun 1.6.1 bölümünde tanıtılan Arşimed Salınlımlı Dalga Enerji Dönüşüm Sistemi'nde çok hafif bir yoğunluğa sahip

nitrojen gazının kullanılmasıyla kısmen iyileşmektedir. Ancak sistem yapı gereği her zaman dalgalar kadar hızlı olmayacaktır. Yapı denizin içinde çalışacağı için yüksek basınçlara mukavemetli olmak zorundadır. İşçiliğin kötü olması yapının zedelenmesine, hatta delinmesine yol açabilmektedir. Böyle bir kaza olması halinde sistemin içine su girebilecek ve sistemin verimini olumsuz yönde etkileyebilecek, belki sistemi tamamen çalışamaz hale getirecektir. 1.6.3 bölümünde tanıtılan Hortum Pompası Dalga Enerji Dönüşüm Sistemi klasik dalga pompası sisteminin üzerine kurulmuş bir sistemdir. Bu sistemin en büyük sorununu elastik hortumun mukavemeti ile bu hortumun dalga tepesi altında uzadığı anda içine aldığı suyun bir kısmını dalga tepesi altında kısılarken hortum cidarını oluşturan metal ızgaradan dışarıya basması olmaktadır. Bir diğer deyişle hortum cidarı su geçirmeyecek şekilde daralana kadar basılan suyun bir kısmı kaybedilecek, sistemin verimi düşmektedir. Dalga Pompası sistemleri içerisinde en farklı yapıya sahip olan ve deniz dibi yerine deniz yüzeyinde yer alıp düşey eksen yerine yatay ekseninde çalışmakta olan 1.6.2 bölümünde yer alan “McCabe Dalga Pompası”nın en büyük sorunları arasında menteşelere gelen farklı yön ve şiddetteki yüklere maruz kalmasıdır. Bu sistem de diğer dalga pompası sistemleri gibi lineer çalışmaktadır. Sistemin çalışma eksenini dışında farklı bir yönden gelen bir dalganın oluşturduğu yük sistemi zorlamaktadır. Bu gibi bir durumda baş ve kık pontonlara gelen yükler menteşelerde çok yüksek momentler oluşturmakta ve zamanla bu menteşeleri koparabilmektedir. Bu yükler aynı zamanda lineer çalışan ve baş ve kık ponton ile merkezi ponton arasında yer alan hidrolik pompalara zarar vermekte, onların verimini düşürebilmekte, hatta pompaları tamamen çalışamaz hale getirebilmektedir. 1.7 bölümünde tanıtılan Ecofys Enerji Dönüşüm Sistemi’nin sorunları arasında dipten deniz yüzeyinin en az 10 m üstüne kadar uzanan çubuğun dalga ve rüzgar kuvvetlerine uzun süre dayanamayıp eğilmesi, hatta burkulup sistemin kaybedilmesi sayılabilir. Bölüm 1.6 ve bölüm 1.7’de tanıtılan sistemlerde kullanılan jeneratörler kapalı hacim içinde bulunmalarına rağmen ya su altında ya da suya yakın bölgelerde bulunmaktadır. Bu da sistemin en pahalı parçasını bir tehlike anında kaybetmek anlamına gelebilmektedir.

1.8 DALGA MOTORU ENERJİ DÖNÜŞÜM SİSTEMİ

Şimdiye kadar tanıtılan bölümlerin tamamında enerji dönüşüm sisteminin en hassas parçaları olan türbin ve/ veya jeneratör su seviyesinin altında ya da su seviyesindeydi. Sistemin en pahalı parçalarının böylesine riskli yere konuşlandırılmaları sakıncalı olabilmektedir. O nedenle farklı sistemlerin arayışları sürmektedir. Amerikalı P. Wright “Dalga Motoru”nu 20. Yüzyıl’ın başlarında Amerikan Patent Dairesi’ne kaydettirmiştir. Bu sistem en ilkel, fakat en basit dönüşüm sistemlerinden biridir. Sistemin avantajı jeneratörün deniz seviyesinden çok yüksekte bir noktada yer alabilmesidir. Deniz dibine bağlı kazıklara asılan halatlara su seviyesi civarında şamandıralar asılır. Şamandıralar aşağı-yukarı hareket ettikçe halatların gidip gelmelerine sebep olurlar. Halatlar bu hareketi sistemin en üst noktasında yer alan jeneratöre iletirler “Şekil 1.8”



Şekil 1.8 P. Wright'e ait Dalga Motoru Enerji Dönüşüm Sistemi

1.9 DALGA MOTORU ENERJİ DÖNÜŞÜM SİSTEMİNİN SORUNLARI

Bölümün 1.8’de tanıtılan dalga motorunun temel avantajı jeneratörün deniz suyuyla temas etmemesidir. Ancak sistemin kurulabileceği bölge mutlaka çok sığ olmalı. Bunun yanında deniz dibine sabitlenen ince çubuklar güçlü dalgalara karşı yeterli mukavemeti sağlayamayabilmekte ve sistem yıkılıp bozulmaktadır. Bir diğer sorunu ise hareket ileticiler oluşturmaktadır. Hareket ileticileri ip, halat gibi bir malzemeden yapılmalıdır.

Ancak çok kalın ip ya da halatlar sürtünme esnasında aşırı direnç göstermekte ve sistemin çalışmasını olumsuz yönde etkileyebilmektedirler. Bunu önlemek için ince halat kullanımına gidilmelidir. Hem hareketli, hem mukavemetli olması açısından halatların çelikten yapılması düşünülebilir. Ancak elik halatlar da yüksek korozyonlu bir ortam olan deniz suyunda korozyona uğrayacaklardır. Halatları boyamak ya da galvanizleyip korozyona karşı mukavemetli hale getirmek de pek parlak bir fikir değildir zira bu işlem halatların hareket kabiliyetlerini azaltmaktadır. Bu durumda yapılabilecek en iyi şek halatları yüksek mukavemetli paslanmaz çelikten imal etmektir. Ancak bu sistem maliyetini yükseltmektedir. Ayrıca dilimizde “paslanmaz elik” olarak adlandırılan elik türünün sadece korozyona karşı “daha mukavemetli” olduğu ve hiç korozyona uğramayacağı anlamına gelmediği de unutulmamalıdır.

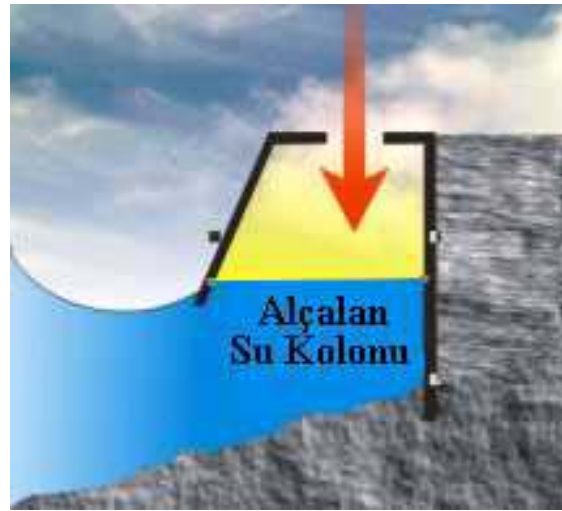
1.10 HAREKETLİ SU KOLONU ENERJİ DöNüşüM SİSTEMİ

Bölüm 1.8’de tanıtılan dalga motoru enerji dönüşüm sisteminin en büyük avantajı hiç şüphesiz jeneratörün deniz suyuyla temas etmemesidir. Ancak bu sistemin en kritik noktası hareketi iletilen halatların makaralardaki sürtünmeleri olmaktadır. Hal böyle olunca bu sistemin avantajını kullanmak, dezavantajını ise minimuma indirecek bir sistem arayışı üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Sürtünmeyi minimuma indirmek için farklı bir “madde” kullanımı düşünülebilir. Bu noktada ilk bakışta dalga motoruna hiç benzemeyen, ancak dalga tepe ve çukurlarının yükseklik farkından faydalanarak enerji dönüşümü yapan bir sistem olması itibarıyla onun “gelişmiş” hali olarak düşünülebilen hareketli su kolonu akla gelmektedir. Hareketli su kolonunda ince çubuklarla sistemin deniz dibine sabitlenmesi yerine sistem dairesel kesitli, içi boş bir silindirden ya da doğal mağaralardan faydalanarak imal edilebilmekte ve bu nedenle kuvvetli dalgalara karşı dalga motoru enerji dönüşüm sistemine oranla daha sağlam bir yapı söz konusu olmaktadır. Dalga motoruna oranla bir avantajı da, sistemin gerek sığ suda, gerekse açık denizde kurulabilmesidir. Hareketli su kolonu enerji dönüşüm sisteminin temel prensibi su seviyesi üzerinde yer alan bir kapalı hacimde havayı hapsetmeye deyanmaktadır. Sistemin altta ve üstte olmak üzere iki açıklığı bulunmaktadır. Alttaki açıklık deniz seviyesinin altında, üstteki ise deniz seviyesinin üzerinde yer almaktadır. Kapalı hacmi teşkil eden kolon içindeki su seviyesi Froude Krylov Hipotez’ne göre kolonun altındaki

açıklık nedeniyle ikincil derecede önem arz eden difraksiyon ve radyasyon etkileri ihmal edildiğinde kolon dışındaki ile aynı kabul edilebilmektedir. Böylece dışarıdaki dalga tepe ve çukurlarına bağlı olarak kolonun içerisinde de su seviyesi yükselmekte ya da alçalmakta ve kolonun su üzerindeki hacmini daraltıp genişletmektedir. Kolonun üstü atmosfere açık olduğu için dalga tepesi durumunda daralan kolondaki hava “Şekil 1.10.1a”daki gibi sıkışıp dışarıya basılmakta iken dalga çukurunda oluşan alçak basınç sebebiyle “Şekil 1.10.1b”deki gibi kolonun içine alınmaktadır.



Şekil 1.10.1a Dalga tepesi halinde sıkışan havanın üstteki delikten dışarıya kaçıışı



Şekil 1.10.1b Dalga çukuru halinde alçak basınç oluşan kolona havanın üstteki delikten hava girişi

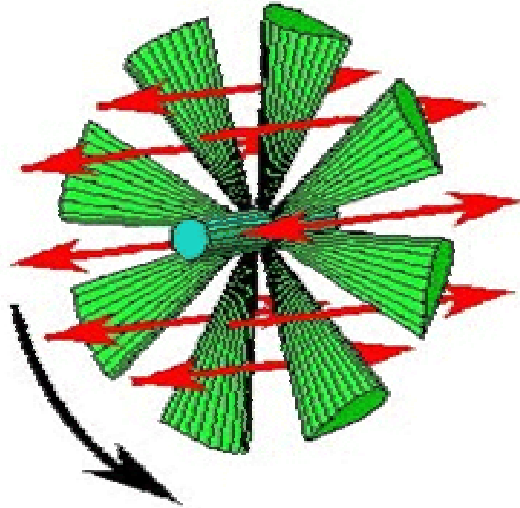
Bu sistemin üst tarafta yer alan boşluğuna bir türbin konulur. Havanın hareketiyle birlikte bu türbin de dönmekte, yani dalga enerjisi hareket enerjisine dönüştürülmektedir. Türbinin ucuna bir jeneratör bağlandığı takdirde türbinden elde edilen hareket enerjisi elektrik enerjisine dönüştürülebilmektedir. Konvansiyonel türbinler akışkanın belli bir yönde ilerlemesi için tasarlanmışlardır. Bu da bunların hareketli su kolonu enerji dönüşüm sisteminde kullanılmaları halinde seçime bağlı olarak ya hava emilirken, ya da basılırken enerji üretilebileceği anlamına gelmektedir. Bu elde edilebilecek enerjinin yarısından fazlasının kaybı anlamına gelmektedir. Sistemin üretebileceği maksimum enerjiyi üretmek için havanın hem basılması hem emilmesi esnasında dönecek ve jeneratöre aynı yönde hareket iletecek bir türbinin önemi bu nedenle son derece büyüktür. Bunu sağlamak için farklı zamanlarda farklı bilim adamları birtakım karmaşık sistemler denemiş ancak ortalama 8-10 saniyede bir açılıp kapanması gereken supaplar bu şartlara fazla dayanamamış ve iflas etmişlerdir. Bu tarz yaklaşımların dışında 2000 yılında Avustralyalı Tom Dennis tarafından bir doktora çalışması olarak yürütülmüş ve hareketli türbin kanatlarının alt ve üst uçlarına sensörler yerleştirilmiştir. Kanadın ucundaki sensörlerden daha yüksek basıncı alan bir mikro işlemciye bir sinyal göndermekte, mikro işlemci ise bu sinyale göre kanatçığın dönme yönünü tayin ederek kanadın hareketli ucundaki elektrik motoruna sinyal iletmektedir. Bununla birlikte sistemin denize açık olan kısmına parabolik bir “giriş kanalı” yapan Tom Dennis bu sayede konvansiyonel titreşimli su kolonu enerji dönüşüm sistemlerine oranla %25 daha fazla verim elde edilebildiğini iddia etmektedir. Bu sistem son derece yeni ve ilk kurulumu oldukça pahalıdır. Ayrıca yüksek teknoloji ürünü mikro işlemci ile sensörlerin deniz şartlarına ne kadar dayanabileceği, yani yapının ömrünün ne kadar olacağı henüz bilinmemektedir. “Şekil 1.10.2”de Tom Dennis projesinin 1/25 ölçeğindeki modeli ile birlikte görülmektedir. Tom Dennis’in projesine benzer yüksek teknoloji ürünlerinin kullanıldığı bazı deneysel projelerin Avustralyalı bilim adamından önce de yapıldığı bilinmektedir. Ancak bu deneyler çok kez başarısız olmuş, ortaya yetersiz sistemler çıkmıştır. Halbuki bir hareketli su kolonu enerji dönüşüm sistemi prototipini daha ikinci dünya harbinden çok kısa bir süre sonra Japon bilim adamı Yoshio Masuda başarılı bir şekilde su tankında denemiştir. Masuda’nın açıkladığı sonuçlar bugün bile bu sistemle çalışan birçok bilim adamına öncülük etmektedir. Masuda prototipinde hem kolona hava emilirken, hem de

kolondan hava basılırken jeneratöre tek bir yönde hareket ileten Wells Türbini'ni kullanmıştır.



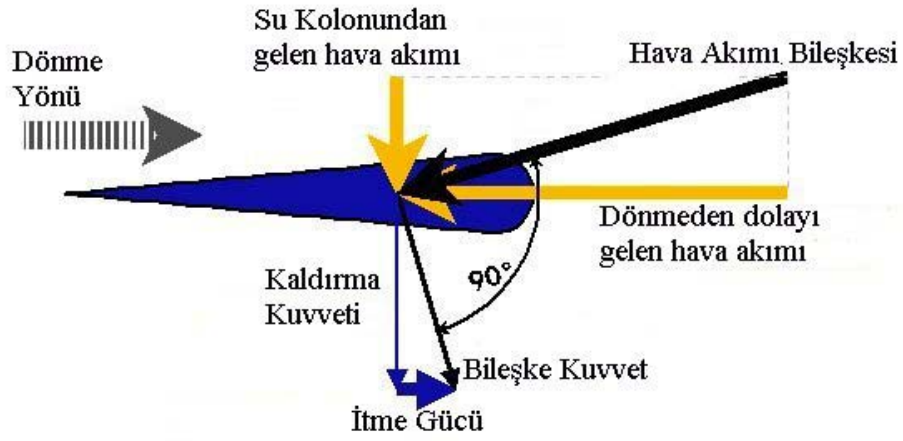
Şekil 1.10.2 Avustralyalı bilim adamı Tom Dennis ve doktora tezi çerçevesinde tasarladığı hareketli su kolonu enerji dönüşüm sisteminin 1/25 ölçeğindeki modeliyle

Wells türbini adını onu ilk geliştiren kişiden almaktadır. Bu türbinin en önemli özelliği her bir kanadının kanat merkezinden geçen eksene göre simetrik olmasıdır. “Şekil 1.10.3” tipik bir Wells Türbini’ni göstermektedir.

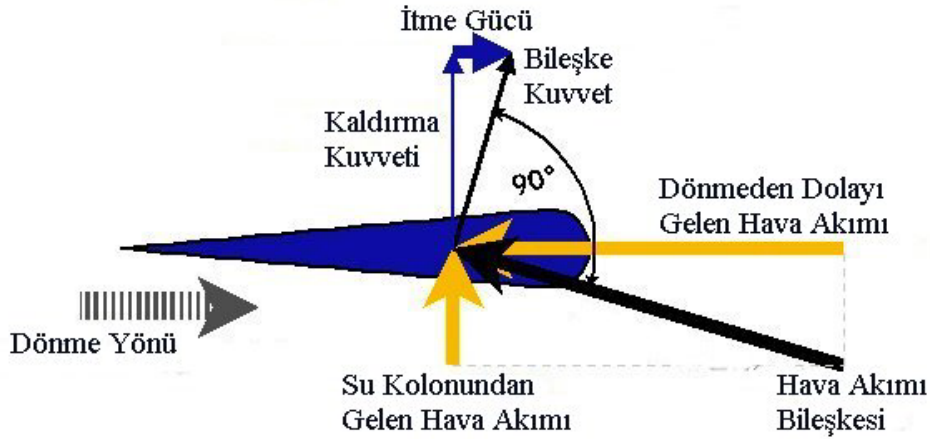


Şekil 1.10.3 Wells Türbini’nin çift yönlü çalışan kanatları

Wells Türbini'nin çalışma prensibini daha iyi anlamak için türbinin kanatlarına gelen kuvvetlerle bu kuvvetlerin doğurdukları itme gücünü görmek gerekmektedir. “Şekil 1.10.4” saat yönünde dönmekte olan bir profile gelen kuvvetlerle bunların oluşturduğu itme güçlerini vektörel olarak göstermekte iken “Şekil 1.10.5” aynı kuvvetleri saat yönünün tersine dönmekte olan bir kanat üzerinde göstermektedir.



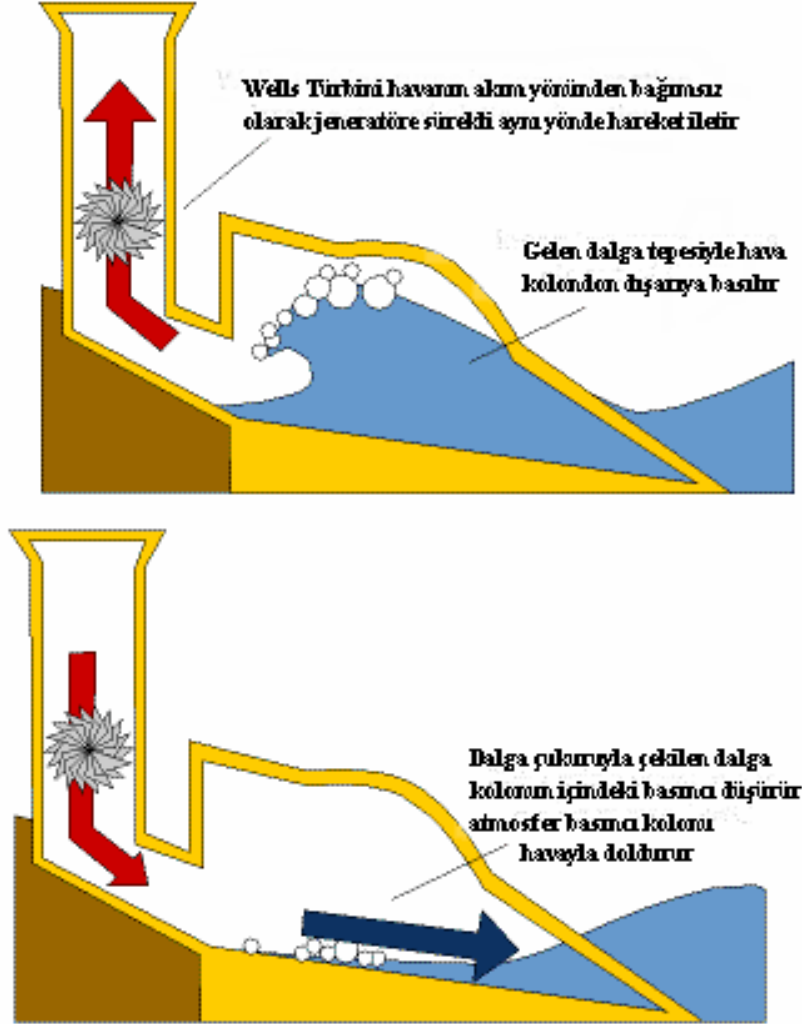
Şekil 1.10.4 Saat yönünde dönmekte olan bir Wells Türbini kanadına gelen yüklerle bunlara gelen tepki kuvvetleri



Şekil 1.10.5 Saat yönünün tersine dönmekte olan bir Wells Türbini kanadına gelen yüklerle bunlara gelen tepki kuvvetleri

Yukarıda da açıklandığı gibi Wells Türbini kullanıldığında hareketli su kolonu enerji dönüşüm sistemi hem kolondan dışarıya hava basarken, hem de kolona hava emerken

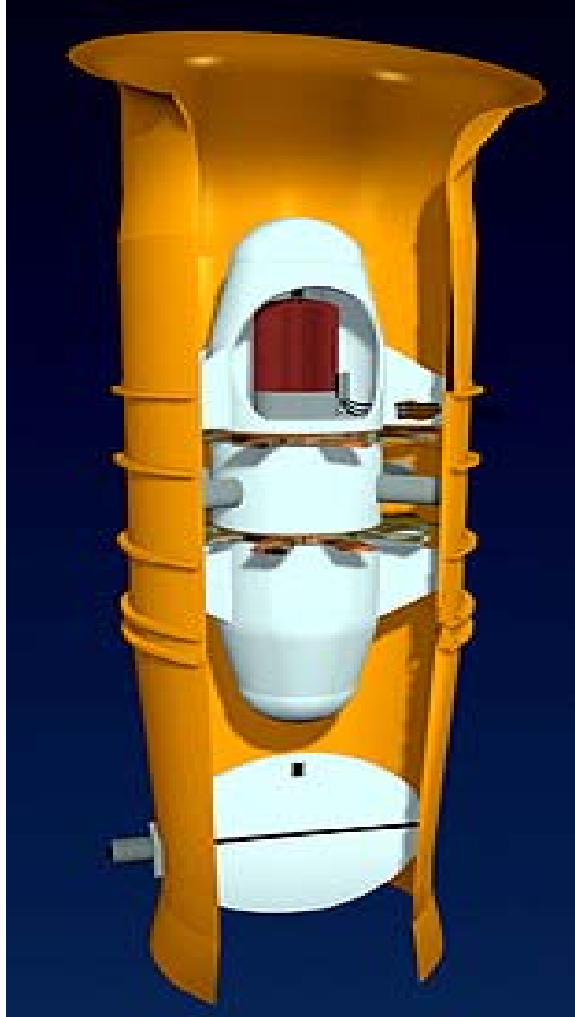
çalışabilmektedir. Hareketli su kolonunun Wells Türbini ile birlikte çalışma prensibini daha iyi anlamak için “Şekil 1.10.6”ya bakmak yeterli olmaktadır



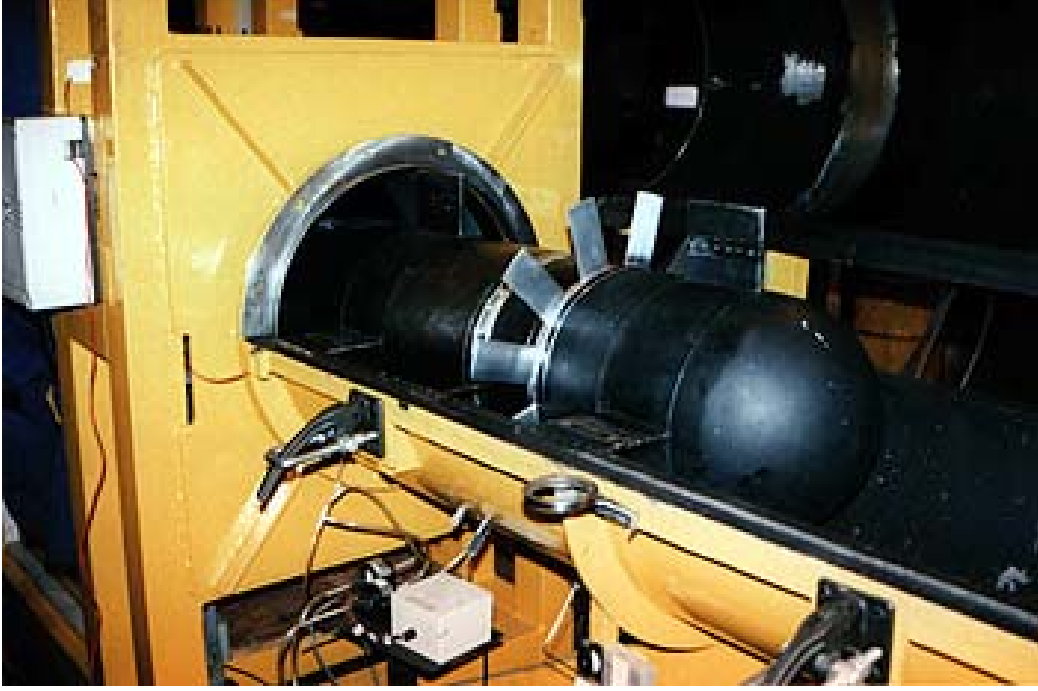
Şekil 1.10.6 Dalga tepe ve çukurlarına birlikte havanın kolona emilmesi ve kolondan basılması ve türbinin dönmesi ile hareketli su kolonunda enerji dönüştürülmesi

Wells Türbini'ne gelen kuvvetlerle onlara tepki olarak ortaya çıkan kuvvetler yukarıda şematize edilmişlerdir. Ancak günümüzde Wells Türbini tek bir pervaneden oluşmamaktadır. İki pervaneli “duo” ve üç pervaneli “tandem” modelleri mevcuttur. Kanat ebatlarını ve sayılarını optimize edebilmek için farklı nümerik yöntemlere ve deneylere başvurulmaktadır. Deneyler arasında “Şekil 1.10.7” ve “Şekil 1.10.8”deki gibi hava kanalında deneyler yer alırken nümerik yöntemlerin başında sonlu farklar ve sonlu elemanlar yöntemleri yer almaktadır. “Şekil 1.10.9”da hava kanalında test edilen türbine

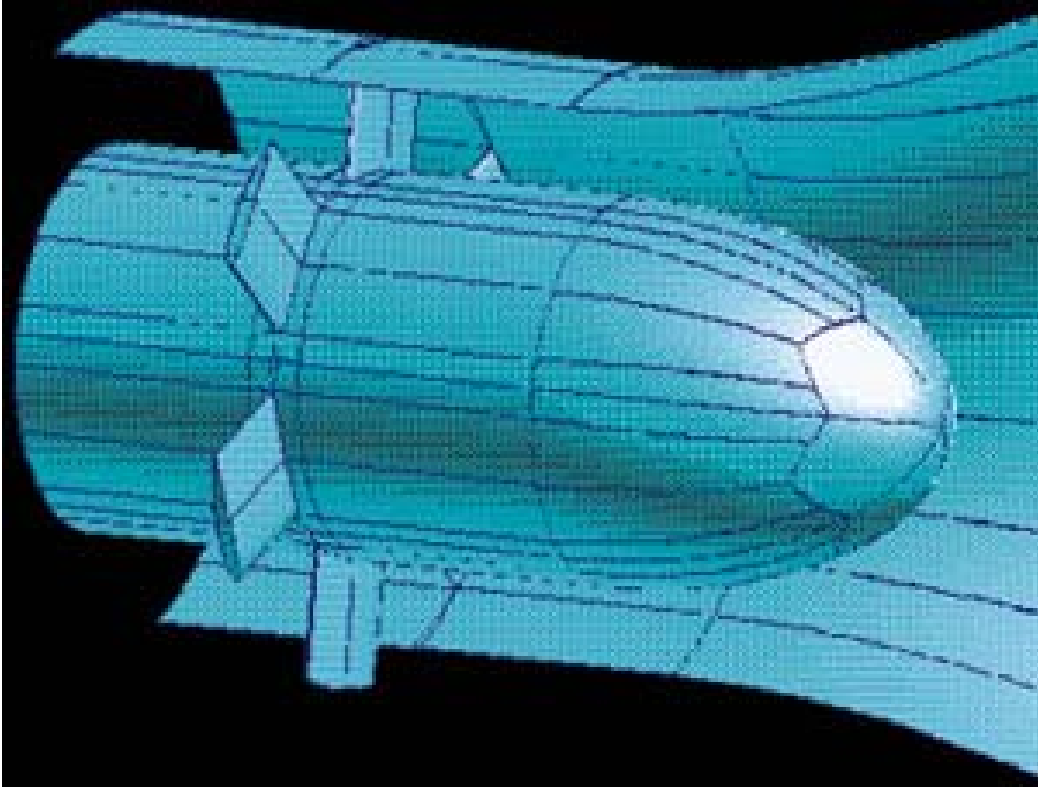
ait mesh sistemi gör÷lmektedir. Bu mesh sistemi daha sonra bir matematiksel yöntemle çözülmekte ve elde edilen matematiksel sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmaktadır.



Şekil 1.10.3a Wells Türbini'nin hava kanalında test edilmesi



Şekil 1.10.3b Wells Türbini'nin hava kanalında test edilmesi



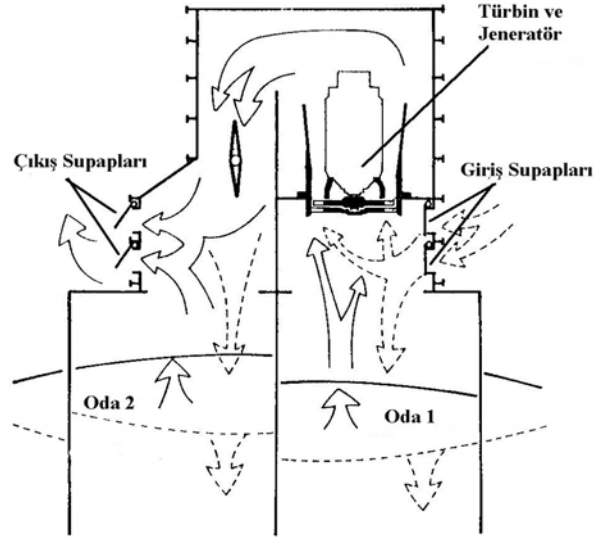
Şekil 1.10.4 Wells Türbini'nin hava kanalındaki davranışının modellenmesi için kullanılan mesh sistemi

1.11 KAIMEI ENERJİ DÖNÜŞÜM SİSTEMİ

Bölümün 1.10’da tanıtılan hareketli su kolonu enerji dönüşüm sistemi diğer sistemlere oranla birçok yönden avantajı olan bir sistem oluşturmaktadır. Sistemin hem açık denizde, hem sığ sularda kullanılabilmesi büyük bir avantaj teşkil etmektedir. 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 gerçekleşmiştir. Kaimei bir gemiye birkaç adet titreşimli su kolonu sisteminin yerleştirilmesiyle gerçekleştirilen bir deneydir. Gemi formundan dolayı denize açık olan kısımlar tek bir düzlem teşkil etmemektedirler. Bu nedenle kullanılan sistemler beklenen düzeyde enerji dönüşümünü yapamamaktadır. Kaimei projesinden çıkarılan en önemli sonuç da budur. Kaimei Projesi sırasında farklı jeneratörler ve farklı türbinler aynı anda test edilmiş ve bunlar arasında bir karşılaştırma yapılabilme olanağı bulunmuştur. Sistemin taşıyan “gemi” 80 m uzunluğunda, 13 m genişliğinde ve 820 ton ağırlığındadır ve toplam 13 adet hava odasına sahiptir. “Şekil 1.11.1” Kaimei’yi açık denizde göstermektedir. 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. Her bir türbin “Şekil 1.11.2”deki gibi iki adet hava odası ile bağlantılıdır. İlk testler sonucunda toplam türbin kapasitesi 375 kW civerında olmuştur.

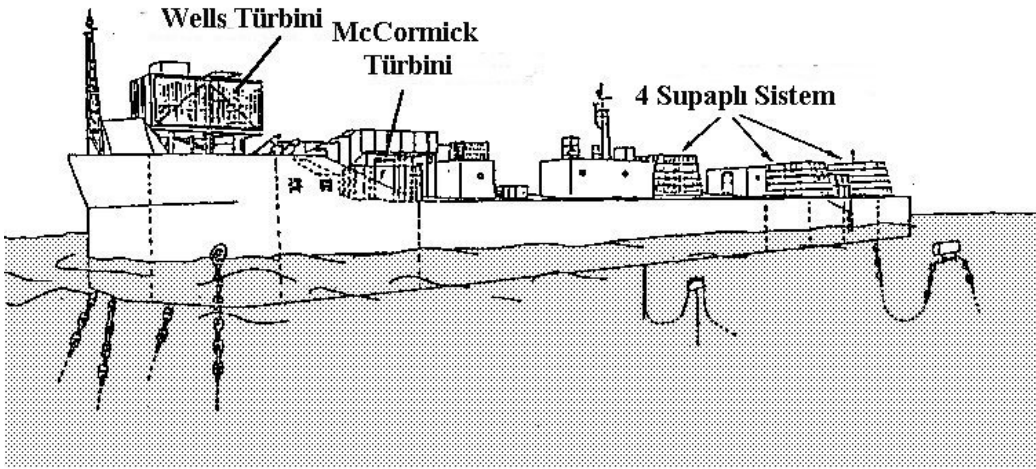


Şekil 1.11.1 Kaimei Enerji Dönüşüm Sistemi



Şekil 1.11.2 Bir türbin iki hava odasına birden bağlanıyor

İlk deneyde kullanılan türbinlerin genel yerleşimleri “Şekil 1.11.3”te gösterilmektedir.



Şekil 1.11.3 1978-1979 yılları arasındaki ilk Kaimei testleri sırasında türbinlerin yerleşimleri

1979-1980 arasında gerçekleşen ikinci test periyodu sırasında sisteme 6 adet Japon yapımı 2 supaplı bir adet Japon ile bir adet Britanya yapımı 4 supaplı türbin kullanılmıştır. Türbinlerin herbiri 125 kW gücünde olduğundan toplam 1000 kW’lık bir türbin kapasitesi ile yapılan testlerde sadece bir adet jeneratör kullanılmıştır. 1985-1986 yılları arasındaki üçüncü ve son testlerde ise 75’er kW’lık 5 adet 4 supaplı türbin sistemi, bir adet 125 kW’lık McCormick Türbini ile 60 kW’lık bir adet Tandem tipi Wells Türbini olmak üzere toplam 560 kW’lık bir türbin kapasitesi ile testler yapılmıştır.

1.12 BÜYÜK BALİNA ENERJİ DÖNÜŞÜM SİSTEMİ

Bölüm 1.10'daki hareketli su kolonundan esinlenerek tasarlanan bir diğer sistem de büyük balina (mighty whale) enerji dönüşüm sistemidir. Sistemin bu adı almasının sebebi genel görünümünün büyük bir balığı andırmasından dolayıdır. “Şekil 1.12.1” ve “Şekil 1.10.2” büyük balina enerji dönüşüm sistemini göstermektedirler.



Şekil 1.12.1 Büyük balina (mighty whale) enerji dönüşüm sisteminin prototipi suya indirilmek üzere

Esas olarak büyük balina enerji dönüşüm sistemini sadece bir enerji dönüşüm sistemi olarak incelemek yanlışır. Büyük balina enerji dönüşüm sistemi özellikle koylarda kurulmuş balık çiftliklerini çok büyük dalgalardan korumak amacıyla tasarlanmıştır. “Şekil 1.12.1”de sağ tarafta kalan baş kısmın resmin sol tarafından kalan kık kısmından oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Yüksek kısım gelen yüksek dalgaları karşılayacak olan kısmı oluşturmakta iken alçak kısım artık genliği çok azalmış olan dalganın çıktığı kısımdır. Su tanklarında 1/100 ölçeğindeki prototip ile yapılan testler sonucu yapının enerjinin % 60'ını kullanabildiği ancak buna karşın yüksek genlikli dalgaların genliklerini % 80 oranında azaltabildiği görülmektedir. Deniz içinde yer alan diğer

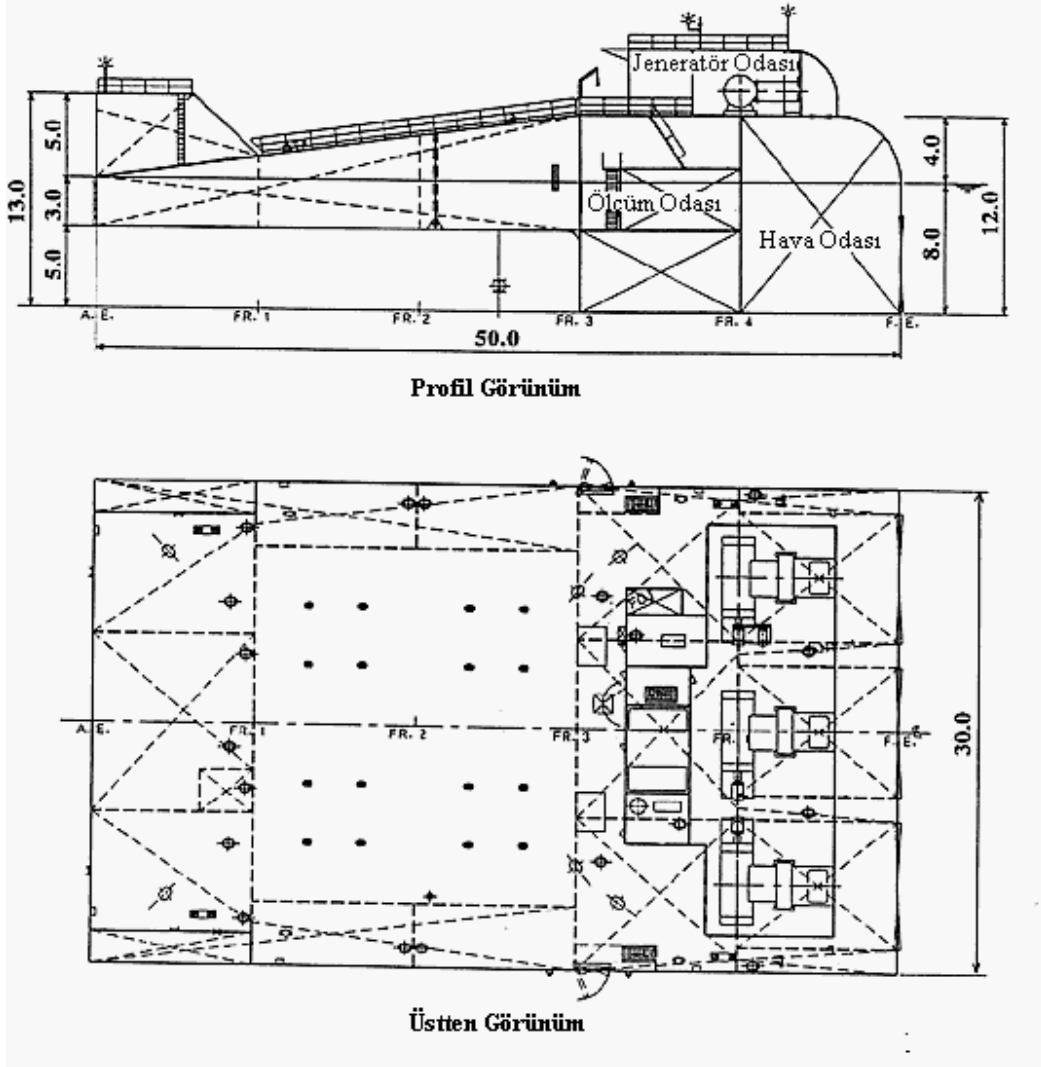
dalgakıran sistemlerine oranla bu sistemin dalga genliklerini bu kadar yüksek oranda azaltabilmesinin çok basit bir sebebi bulunmaktadır. Diğer sistemler dalgayı yansıtmaktadırlar. Halbuki büyük balina dalgaları yansıtmak yerine onları absorbe etmekte ve sahip oldukları enerjiyi dönüştürmektedir.



Şekil 1.12.2 Büyük balina (mighty whale) enerji dönüşüm sistemi prototipi suyun içinde

Büyük balina enerji dönüşüm sisteminin prototipinin genel boyut ve yerleşimi “Şekil “1.12.3”te görülmektedir. Prototipin resminde yüksek görülen kısım genel yerleşimden anlaşıldığı üzere jeneratörü barındırmaktadır. Onun hemen altında hava odası bulunmaktadır. Sisteme gelen yüksek genlikli dalgalar hava odası içinde yükselirken bu odanın içindeki havayı sıkıştırmaktadırlar. Bu esnada yukarıdaki açıklıktan kaçan hava bir türbini döndürür ve jeneratöre hareket iletilmesini sağlar. Diğer taraftan gerek içeride sıkışan havanın atmosfer basıncından daha yüksek olması sebebiyle, gerekse hava odasının duvarlarına çarpması sebebiyle enerjisinin bir kısmını kaybetmektedir. Bir diğer etkeni ise büyük balina enerji dönüşüm sisteminin genişliğinin gelen dalganın genişliğinden küçük olması teşkil edebilmektedir. Hal böyle olduğu durumlarda dalganın

bir kısmı direnç görürken bir kısmı görmemekte ve dalga dağılıp enerjisinin bir kısmını yitirmektedir.



Şekil 1.12.3 Büyük balin (mighty whale) enerji dönüşüm sistemine ait prototipin genel boyutları ve genel yerleşimi

Prototipin genel yerleşiminde üstten görünümde her üç hava odasının da hemen üstünde birer adet türbin bulunduğu görülmektedir. Bunlar “Şekil 1.12.4”te görülen Wells türbinleridir. Türbinlerin hepsi sistemin simetri ekseninde yer alan jeneratöre bağlanmaktadır. Prototipte kullanılan jeneratör “Şekil 1.12.5”te görülmektedir.



Şekil 1.12.4 Büyük balina (mighty whale) enerji dönüşüm sistemi prototipine ait bir Wells türbini

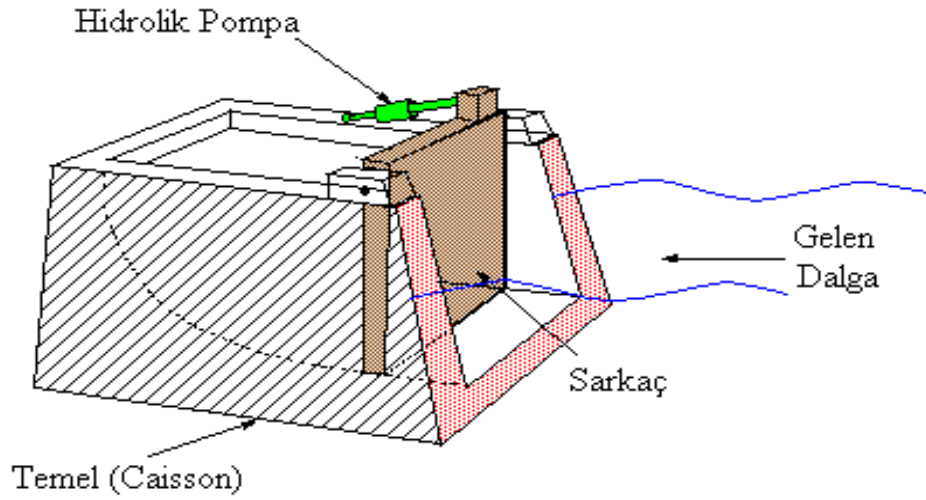


Şekil 1.10.5 Büyük balina (mighty whale) enerji dönüşüm sisteminin prototipine ait jeneratör

Büyük balina enerji dönüşüm sistemi hareketli su kolonu mantığı üzerine kurulu olup aynı zamanda bir dalgakıran olarak da hizmet veren çok özel bir hibrit sistemdir. Sistem bir gün, her ne sebeple olursa olsun, enerji üretemeyecek olsa dahi, dalgaları kırmaya ve görevlerinden birini yerine getirmeye devam edebilecektir.

1.13 SARKAÇLI ALET

1.12 bölümünde tanıtılan büyük balina enerji dönüşüm sistemi yukarıda da açıklandığı gibi hem enerji dönüşümü hem dalgakıran olarak hizmet verebilmektedir. Sarkaçlı alet de aynı mantıkla bu iki amacı yerine getiren ve çok basit bir çalışma prensibine sahip olan bir sistemdir. Sarkaçlı alet “Şekil 1.13.1”de görülmektedir.

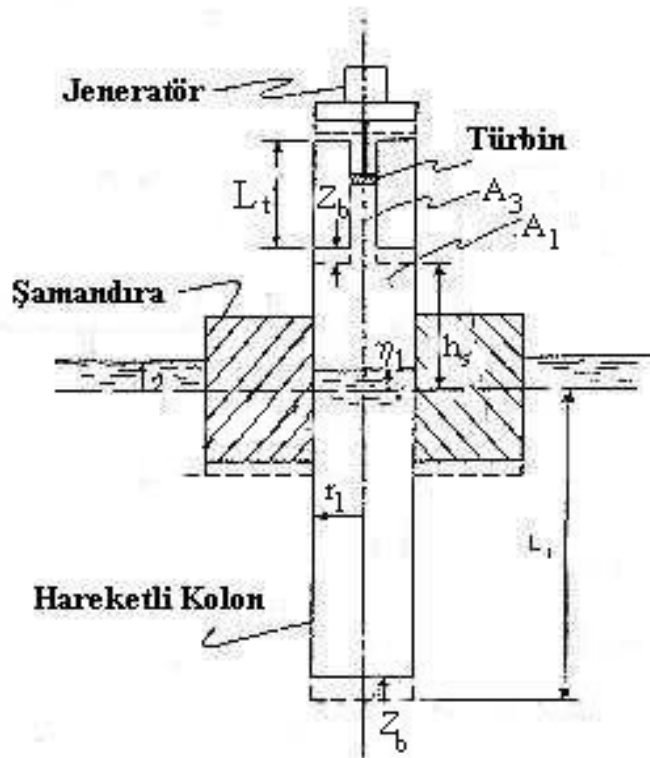


Şekil 1.13.1 Sarkaçlı alet enerji dönüşüm sisteminin temel çalışma prensibi

Sarkaçlı aleti enerji dönüşüm sisteminden çok bir dalgakıran olarak görmek gerekmektedir. Deniz dibine yerleştirilen bir temelin dalganın geliş yönüne doğru bir kapak takılmaktadır. Kapak sadece üstten menteşelerle tutturulmaktadır. Hızla gelen dalga bu kapağa çarpmakta ve onu ileri geri hareket ettirmektedir. Bu nedenle bu sistemin kapağına kapak yerine sarkaç denmektedir. Kapak gelen dalga karşısında içeriye doğru açılırken temel yapı içine de kısmen suyun girmesine izin vermektedir. Dalga enerjisini kaybedip dalga tepesi yerini dalga çukuruna bıraktığında ise sarkacın ağırlığının oluşturduğu basınç temel içindeki suyun basıncından daha yüksek olmakta ve sarkaç suyu temelden dışarıya basmaktadır. Böylece bu hareket sürekli devam etmektedir. Sarkacın hareketi kendisine bağlı olan bir hidrolik pompayı tahrik etmekte ve bu şekilde enerji üretmekte aynı zamanda dalgayı kırmaktadır.

2. SABİTLENMEMİŞ HAREKETLİ SU KOLONU

“Şekil 2.1”de verilen “yüzen titreşimli su kolonu” sisteminden görüleceği gibi, sistemin etrafına bir şamandıra giydirilmiş ve bu sayede sistemin bir kısmı suyun üzerinde, bir kısmı da suyun altında kalacak şekilde tasarlanmıştır. Kolonun her iki ucu da açıktır. Suyun altında kalan bölümün içerisine su girmekte ve oluşturduğu basınç ile kolonun içindeki havayı dalga tepe ya da çukuru durumlarından birine göre kolondan dışarı itmekte ya da kolonun içine çekmektedir. Kolonun su üzerinde kalan ve hava giriş çıkışını sağlayan bölümde ise bir türbin bulunmaktadır. Bu türbin havanın kolona giriş çıkışı sırasında dönmekte ve jeneratöre hareket iletmektedir. Jeneratöre iletilecek hareketin sürekli ve aynı yönde olması jeneratörün üreteceği enerjinin devamlı olması anlamına geleceğinden bunu sağlayabilen “Wells Türbinleri” bu sistem için en çok tercih edilen türbinler olmaktadır.



Şekil 2.1 Yüzen titreşimi su kolonu

Bu sistemin havayı basması ya da emmesi yoluyla türbine enerji sağlaması nedeniyle sistemin temeli iki farklı nokta arasındaki basınç farkının enerji üretimine neden olduğu söylenebilmektedir. Buna göre sistemin çözümünü sağlayacak şekilde aşağıda verildiği gibi bir teori elde edilebilmektedir.

Bir akışkandaki basınç alanı akışkan sıkıştırılmaz kabul edildiğinde;

$$-\frac{\partial\Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial\Phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial\Phi}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial\Phi}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{P}{\rho} + gz = f(t) \quad (2.1)$$

olarak verilebilmektedir. Burada Φ havanın hız potansiyelini, P bir noktadaki basıncı, ρ havanın yoğunluğunu, x , y ve z kartezyen koordinat sisteminde birbirine dik doğrultuları $f(t)$ terimi ise Bernoulli Sabiti'ni ifade eder. Şekil 2.1 'deki su kolonu sistemi için kolonun içine giren ve kolondan çıkan hava inceleneceği için söz konusu sistemde havanın sayfa düzlemine dik ve yatay hızları ihmal edilecektir. Bu şekilde sistemin anlaşılması dahada kolaylaşacak, sistemdeki bilinmeyen parametreler önemli ölçüde azalacak, teori çok daha az denklemle ifade edilebilecektir. Buna göre sayfa düzlemine dik ve yatay hız bileşenleri ihmal edildiğinde (2.1) denklemi aşağıdaki hale dönüşür.

$$-\frac{\partial\Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial\Phi}{\partial y} \right)^2 + \frac{P}{\rho} + gz = f(t) \quad (2.2)$$

Yukarıda verilen (2.2) denklemindeki $\frac{\partial\Phi}{\partial y}$ terimi havanın düşey yöndeki hız bileşenini ifade etmektedir. Teori gereği sadece bir düzlemdeki hız (düşey düzlem) inceleneceği için bu terim V ile ifade edilecektir. $\frac{\partial\Phi}{\partial t}$ terimi ise potansiyelin zamana göre değişimini göstermektedir. Bu terimi daha kolay anlayabilmek için $\frac{\partial\Phi}{\partial t} = \frac{dW}{dt}$ yazılabilir. dW/dt terimi enerjinin zamanla değişimini ifade eder. Teori Şekil 2.1'deki yüzen su kolonu sistemine uygulandığında bu terim birim hava başına türbine gelen enerji miktarı $\left(\frac{dW}{dw_a} \right)$ anlamına gelmektedir. Burada w_a terimi birim hava ağırlığını temsil eder. Bu noktada (2.1) ifadesiyle verilen Bernoulli Denklemi aşağıdaki şekle dönüşmektedir.

$$-\frac{dW}{dw_a} + \frac{1}{2}V^2 + \frac{P}{\rho} + gz = f(t) \quad (2.3)$$

Havanın sıkıştırılabilirliği ihmal edilirse, yani havanın sıkıştırılmaz bir akışkan olduğu kabul edilirse su kolonu içindeki hacmin korunması gerektiği ortaya çıkar. Bu kabulün yapılmasıyla da sonuca çok az etki edecek birkaç terimden kurtulunup uzun matematiksel ifadelerin yerine çok kısa ifadeler elde edilir. Hacim korunacağı için de Bernoulli Denklemi'nin sağında yer alan $f(t)$ ile temsil edilen kuvvet terimi sıfır değerini alacaktır. Buna göre Bernoulli Denklemi'nin son hali aşağıdaki gibi olacaktır.

$$-\frac{dW}{dw_a} + \frac{1}{2}V^2 + \frac{P}{\rho} + gz = 0 \quad (2.4)$$

Bu denklem bir basınç alanını ifade ettiğinden dolayı, bu basınç alanının sınırlarının belirlenmesi gerekmektedir. Sınırlar serbest su yüzeyi ile su kolonunun atmosfere açık olduğu üst kısmı olarak Şekil 2.1'den kolaylıkla belirlenebilir. Şekil 2.1'deki su kolonu sisteminden enerji üretimi havanın yer değişimi ile olacağından sadece havanın kolon içindeki hareketi esas alınmalıdır.

Kullanılacak teoride kolaylık olması bakımından 1 indisi serbest su yüzeyinin hemen üzerini ifade ederken; 3 indisi de su kolonunun çıkış bölgesi olan üst kısmını ifade etmektedir. S_3 terimi Şekil 2.1'deki havanın denge durumundan çıkışa kadar olan yer değişimini ifade etmektedir. Z_b terimi ise düşey düzlemdeki yer değişimini göstermektedir. Bu durumda su kolonu üzerindeki ortalama hava çıkışının hızı aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$\overline{V_3} = \dot{S}_3 - \dot{Z}_b \quad (2.5)$$

Burada $\dot{S}_3$ çıkıştaki havanın düşey doğrultudaki hızını, $\dot{Z}_b$ ise kolonun düşey doğrultudaki hızını ifade eder. Benzer şekilde serbest su yüzeyi üzerindeki ortalama hız aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\overline{V_1} = \dot{\eta}_1 - \dot{Z}_b = \dot{\zeta} \quad (2.6)$$

Buradaki $\overline{\eta_1}$ terimi su kolonu içinde kalan serbest su yüzeyinin düşey yöndeki yer değişimini Z_b terimi ise türbini içinde barındıran borunun düşey yöndeki yer değişimini vermektedir. Bu terim Şekil 2.1'deki kolon için uyarlandığında kolonun bir silindirden, yani sayfa düzleminde dik düzlemde bir daireden, oluştuğu ve kolon içindeki su yüzeyinin kolonun her yerinde farklı bir yükseklikte olabileceği göz önüne alındığından dolayı ortalama bir değer genlik değerinin kullanılması gerekir. Bu yüksekliğin Şekil 2.1'deki 1 indisi ile gösterilen A_1 alanı içinde yer alacağı göz önünde bulundurulursa serbest su yüzeyinin düşey yöndeki ortalama yer değişimi aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$\overline{\eta_1} = \frac{1}{A_1} \int_0^{r_1} \int_{-\pi}^{+\pi} \eta_1 r d\theta dr \quad (2.7)$$

Bu durumda (2.4) ifadesindeki Bernoulli Denklemi aşağıdaki formu alır.

$$\frac{V_1^2}{2} + \frac{P}{\rho} = \frac{dW}{dw_a} + \frac{V_3^2}{2} + gz \quad (2.8)$$

(2.8) denklemindeki gz terimini havanın düşey yer değişimini ifade eder ve iki bileşeni vardır. Birincisi deniz seviyesinin durağan olmadığı ve sürekli değiştiği göz önüne alınacak olursa kolon içinde hava zamana ve kolonun içindeki yere göre farklılık göstereceği düşünülmektedir. Bunu ifade etmek için farklı bir koordinat sistemi kullanmanın faydalı olduğu düşünülmekte ve aşağıdaki terim ile ifade edilmektedir.

$$g z_1 = \int_{\xi_1}^{\xi_3} \frac{\partial \overline{V}}{\partial t} d\xi \quad (2.9)$$

Burada ξ eğrisel koordinat sistemini tanımlar. Bu terim kolonun içindeki suyun ortalama hızının zamana göre değişimini eğrisel koordinat sistemine göre ifade etmektedir. Bir diğer ifade ile kolonun içindeki havanın hızının zamana göre değişimini temsil etmektedir. Şekil 2.1'e göre bu ifadeyi aşağıdaki şekilde basitleştirmek mümkündür.

$$g z_1 = \int_{\xi_1}^{\xi_3} \frac{\partial \overline{V}}{\partial t} d\xi = (h_s - \overline{\eta_1} + z_b + \frac{A_1 L_t}{A_3}) \dot{\xi} \quad (2.10)$$

İkincisi ise; Şekil 2.1'deki kolonun içinde kalan hava emme ve basma yoluyla zorlanacağı ve dolayısıyla kolonun içinde düzgün bir akım yerine karmaşık bir akım izleyeceği aşikardır. Bu durumu mümkün olduğu kadar basite indirgemek için söz konusu akımı türbülanslı akım kabul edip meydana gelebilecek birtakım kayıpları içinde barındıran bir terimle çarpmak yerinde olacaktır. Türbülanslı akım hızın karesi ile ifade edilir. Hızın yönünü tayin etmek için hız bileşenlerinden birinin işareti devamlı surette “etkisiz” olmalıdır. Bunun matematiksel anlamı ise bu ifadenin mutlak değerinin alınmasının gerekli olduğudur. Şekil 2.1'de gösterilen sistemde hız bileşenini havanın hızını yaratan dalganın genliğinin zamana göre değişimi oluşturmaktadır. Buna göre gz teriminin türbülanslı akımdan dolayı meydana gelen bileşeni Şekil 2.1'deki sisteme uygulandığında aşağıdaki ifadeye karşılık gelir.

$$gz_2 = \sum_i \delta_i \dot{\zeta} \left| \dot{\zeta} \right| \quad (2.11)$$

Bu ifade yer alan δ_i terimi türbülansa bağlı sönüm katsayısını ifade eder. (2.10) ve (2.11) denklemleri (2.8) denkleminde yerine koyulup türbine gelen birim hava ağırlığı başına düşen enerji miktarı eşitliğin bir tarafında bırakılacak ve tüm denklem yer çekimi ivmesi olan g terimine bölünecek olursa elde edilen yeni denklem aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$\frac{dW}{dw_a} = \frac{V_1^2 - V_3^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} + \sum_i \delta_i \dot{\zeta} \left| \dot{\zeta} \right| + \frac{1}{g} \dot{\zeta} (h_s - \bar{\eta}_1 + z_b + \frac{A_1 L_t}{A_3}) \quad (2.12)$$

O halde kolonun içindeki suyun hareketinden dolayı kolonun içinde hareket eden havanın enerjisi aşağıdaki şekilde ifade edilir.

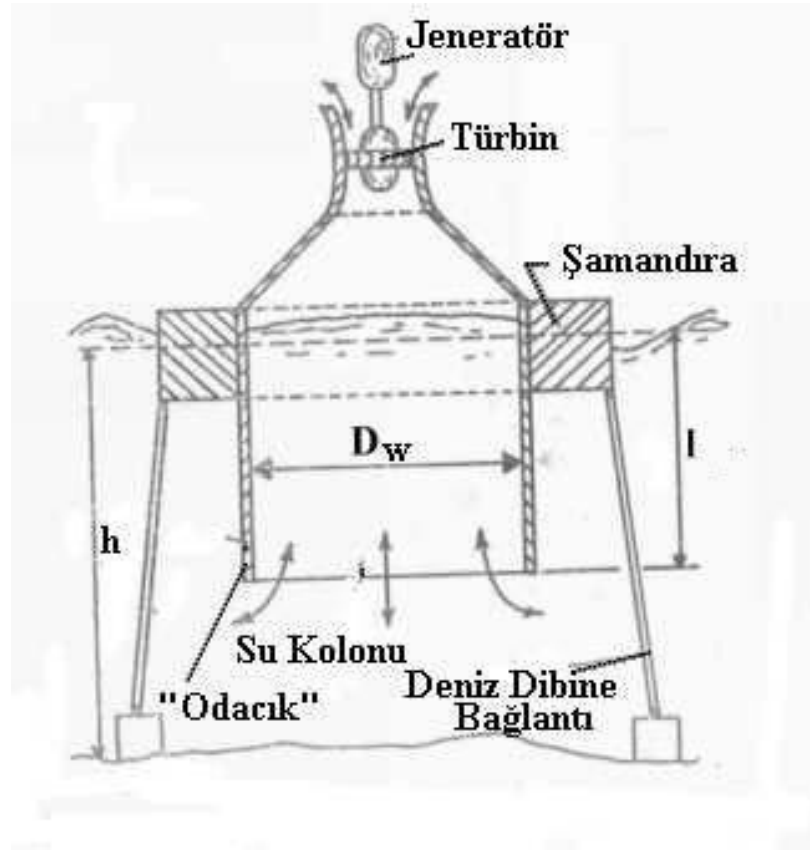
$$\begin{aligned} \frac{dW}{dt} &= \rho_a g \dot{\zeta} r_1^2 \pi * \frac{dW}{dw_a} = \\ &= \rho_a g \dot{\zeta} r_1^2 \pi \left[\frac{V_1^2 - V_3^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} + \sum_i \delta_i \dot{\zeta} \left| \dot{\zeta} \right| + \frac{1}{g} \dot{\zeta} (h_s - \bar{\eta}_1 + z_b + \frac{A_1 L_t}{A_3}) \right] \end{aligned} \quad (2.13)$$

3. SABİTLENMİŞ HAREKETLİ SU KOLONU

Tek bir yönde harekete zorlanan bir sistem için genel olarak hareketin denklemi

$$m\ddot{z} + b\dot{z} + cz = F(t) \quad (3.1)$$

şeklinde yazılabilir. Burada z düşey yöndeki yer değiştirme miktarını, m hareket halindeki cismin kütlesini, b sönüm kuvveti katsayısını, c ise geri getirme katsayısını ifade etmektedir. Denklemin sağında yer alan $F(t)$ terimi ise sistemi harekete zorlayan zamana bağlı kuvvetlerin toplamını ifade etmektedir.



Şekil 3.1 Deniz dibine sabitlenmiş hareketli su kolonu

Suyun içindeki bir sistemin ivmeli hareketleri suda bu ivmeyle orantılı bir atalet kuvveti doğurur. Bu kuvvet ek su kütlesi adını alır, **m** ile ifade edilen kütle boyutundadır ve **a** ile ifade edilmiştir. Böylece denklemin son hali aşağıdaki gibidir.

$$(m+a)\ddot{z}+b\dot{z}+cz=F(t) \quad (3.2)$$

Yukarıda (3.2) denkleminin verilen sisteme ait tepki fonksiyonu $H(\omega)$ aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$H(\omega)=\frac{1}{\omega_n^2 \left[\left(1-\frac{\omega^2}{\omega_n^2} \right) + 2ib_c \frac{\omega}{\omega_n} \right]} \quad (3.3)$$

Bu durumda ivmeli hareket yapan ve ek su kütlesi a olan zorlanmamış bir cisminin doğal frekansı

$$\omega_n = \sqrt{\frac{\rho g \pi D^2}{4(m+a)}} \quad (3.4)$$

ve boyutsuz sönüm katsayısı,

$$b_c = \frac{R_r + R_e}{2 \sqrt{\left(\frac{\rho g \pi D^2}{4} \right) (m+a)}} \quad (3.5)$$

Denklem (3.2)'de verilen ek su kütlesi ve sönüm katsayısı frekansa bağlı terimlerdir. Söz konusu terimler doğada meydana gelen ve farklı zamanlarda farklı bileşenlerden oluşabilecek kuvvetleri temsil ettikleri için denklemin sağ tarafında yer alan kuvvet terimi de zamana ve frekansa bağlı olmaktadır. Yani:

$$[m+a(\omega)]\ddot{z}+b(\omega)\dot{z}+cz=F(\omega,t) \quad (3.6)$$

Bu denklemde $a(\omega)$ ile ifade edilen ek su kütlesi şeklin geometrisine bağlı iken, $b(\omega)$ ile ifade edilen sönüm katsayısı R_v ile ifade edilen viskoz dirence, R_r ile ifade edilen radyasyon direncine ve R_e ile ifade edilen etkin dirence bağlıdır.

Viskoz direnç tamamen akışkanla ilgilidir. Deniz suyunun viskozitesi çok düşük bir direnç oluşturacağı için ihmal edilebilir. Radyasyon direnci ile ifade edilen direnç ise Şekil 3.1'deki sistemin suda dalıp çıkmasıyla 360°'lik bir alanda kendisinden dışa doğru çıkıp giden dalgalara karşı koyan direnci anlatmaktadır. Söz konusu dalgaların

oluşumu Şekil 3.1’deki sistemin dalıp çıkma frekansına bağlı olacağı için radyasyon direncinin de frekansa bağlı olduğu söylenebilmektedir. Etkin direnç ile ifade edilen terim ise kullanılabilecek enerjiyi oluşturan kuvvetlere karşı gelen direnci oluşturmaktadır. Etkin direnç de radyasyon direnci gibi Şekil 3.1’deki sistemin dalıp çıkma hareketine bağlı olduğundan frekansa bağlıdır. Bu bilgiler doğrultusunda sönüm katsayısı aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$b(\omega) = R_r(\omega) + R_e(\omega) \quad (3.7)$$

Denklem (3.6)’nın sağında yer alan kuvvet, basınç ve hidrostatik kuvvet bileşenlerinden oluşmaktadır. Dolayısıyla cismin şekli önem kazanmaktadır. “Şekil 3.1”deki sistemde hareket eden kolon geometrik açıdan bir silindir olduğuna göre bu kuvvetin oluşumuna sebep olan cisim bir silindir olacaktır. Silindir çapı dalganın genliğinden çok daha küçük kabul edildiğinde silindire çarpıp yansıyan ve bir “yayılma” veya diğer bir dille “radyasyon” gibi hareket edecek olan dalga enerjileri ihmal edilmektedir. Böylece simetrik bir silindir için dalga kuvveti “taşıracağı su” ile basınç kuvveti ve cisim geometrisinin yaptığı etkinin toplamı olacaktır. Böylece dalga kuvveti aşağıdaki formu alır.

$$F(\omega, t) = \left[\frac{\rho g \pi D^2}{4} + \frac{\rho g \pi D^2}{4} * f(kh) \right] \eta(t) = F_o(\omega) \eta(t) \quad (3.8)$$

Buna göre denklem (3.8)’deki ilk $\rho g \pi D^2 / 4$ terimi hidrostatik basıncı, ikincisi ise dinamik basıncı ifade eder. Denklem (3.8)’de yer alan $f(kh)$ terimi cismin şekline ve cismin bulunduğu bölgedeki su derinliğine bağlı bir basıç kuvvetini ifade eder ve dalga sayısı $(kh) \leq 2$ alındığında denklem (3.9 a)’daki gibi ifade edilebilir. Dalga sayısı k ise derin su kabulü yapılması halinde denklem (3.9 b)’daki gibi ifade edilir.

$$f(kh) = \left(1 - \frac{k^2 D^2}{32} \right) \frac{\cosh[k(h-l)]}{\cosh(kh)} \quad (3.9 a)$$

$$k = \frac{\omega^2}{g} \left[\frac{1}{\tanh(kh)} \right] \quad (3.9b)$$

Denklem (3.8)'in sağ tarafındaki $F_o(\omega)$ terimi aslında $-\infty < t < +\infty$ arasında integre edilmelidir. Bunun fiziksel anlamı, dalga kuvvetini etkileyen tüm bileşenlerin bu kuvvete dahil edilmesi gerektiridir. Ancak bu pratik olarak söz konusu olmamaktadır. Bu nedenle dalga kuvvetini $-T \leq t \leq +T$ arasında integre etmek yanlış olmayacaktır. Söz konusu denklemi $-T \leq t \leq +T$ arasında integre ederek sayısal bir açılım olan Fourier Transform Serisi'ne açma işlemi de gerçekleştirilebilmektedir. Ancak (3.8) denkleminde yazdığımız zorlayıcı kuvvetin bazı bileşenleri ihmal edileceği için $-T \leq t \leq +T$ arasında integre edilecek zorlayıcı kuvvet $F_T(\omega)$ ile ifade edilsin. Böylece F_o dalga kuvveti yerine yaklaşıtı olarak aşağıdaki gibi F_T yazılabilir.

$$F_T(\omega) = \int_{-T}^{+T} F_T(\omega, t) e^{-i\omega t} dt \quad (3.10)$$

Burada $F_T(\omega, t)$ ile $F_T(\omega, t')$ arasında Parsenal Teoremi uygulanarak bir integrasyon yapıldığında aşağıdaki denklem yazılabilir. [1]

$$\int_{-T}^{+T} F_T(\omega, t) F_T(\omega, t') dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F_T(-\omega) F_T(\omega) e^{i\omega \tau} d\omega \quad (3.11)$$

Burada $\tau = |t - t'| \rightarrow 0$ alınır. Bu integrasyonun integrantındaki çarpım tanımladığımız zorlayıcı kuvvet cinsinden aşağıdaki şekilde de yazılabilir.

$$F(\omega, t) F(\omega, t') = F_0^2(\omega) [\eta(t) \eta(t')] \quad (3.12)$$

Böylece denklem (3.11)'in son hali

$$\lim_{\infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} F_T(\omega, t) F_T(\omega, t') dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S_F(\omega) e^{i\omega \tau} d\omega \quad (3.13)$$

şeklini alır. Burada $S_F(\omega)$ kuvvet fonksiyonunun spektral yoğunluğunu ifade etmektedir. (3.13) denkleminde spektral yoğunluk $S_F(\omega)$ çekilirse aşağıdaki denklem elde edilir.

$$S_F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega, t) F(\omega, t') e^{-i\omega \tau} d\tau = F_0^2(\omega) \int_{-\infty}^{+\infty} \eta(t) \eta(t') e^{-i\omega \tau} d\tau \quad (3.14)$$

Bu ifadede:

$$\tau \text{ için } \tau = |t - t'| \rightarrow 0 \quad (3.15)$$

yazılacak olursa; serbest su yüzeyi değişiminin karesi elde edilir:

$$\begin{aligned} \eta^2(t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S_{\eta}(\omega) d\omega = \frac{1}{\pi} \int_0^{+\infty} S_{\eta}(\omega) d\omega \\ &= \int_0^{+\infty} \left[1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right] \tanh(kh) S(\omega) d\omega \end{aligned} \quad (3.16)$$

Denklem (3.16)'daki $S_{\eta}(\omega)$ terimi bir çift fonksiyonu, $S(\omega)$ ise ampirik bir dalga enerji spektrumunu ifade eder. Sistemin kurulacağı bölgeye en uygun dalga spektrumu seçilip kullanılmalıdır. Örneğin Pierson – Moskowitz tarafından 1964 yılında yayımlanan enerji spektrumu burada uygulanabilir. Pierson Moskowitz dalga enerji spektrumu aşağıdaki ifadeyle verilir.

$$S(\omega) = \frac{A}{\omega^5} e^{-\frac{B}{\omega^4}} \quad (3.17)$$

Burada $A = 8,1 \times 10^{-3} \times g^2$, $B = 0,74 \times [g/V_{\omega}]^4$ olup, g yer çekimi ivmesini, V_{ω} deniz yüzünden 19 m yüksekte ölçülen rüzgar hızını, ω dalganın dairesel frekansını ifade eder. Denklem (3.16)'daki integralin integrantı

$$S_h(\omega) = \left[1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right] \tanh(kh) S(\omega) \quad (3.18)$$

olarak tanımlanır ve kolonun içindeki enerji akışını ifade eder. Enerji akışı kolonun içindeki toplam gücü ifade eden denklem (3.33)'te kullanılacaktır. Öte yandan denklem (3.16)'yı suyun içinde hareket eden bir cisim için yazacak olursak hareketli cismin düşey yer değiştirmesinin karesi spektrum cinsinden aşağıdaki ifadeyle tanımlanır.

$$z^2(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S_z(\omega) d\omega \quad (3.19)$$

Bu durumda yer deşiştirmenin enerji spektral yoğunluğu

$$S_z = \int_{-\infty}^{+\infty} [z^2(\tau)] d\tau = \frac{\omega_n^4 |H(\omega)|^2}{\frac{\rho g \pi D^2}{4}} S_F(\omega) \quad (3.20)$$

olmaktadır.

3.2 GÜÇ ÜRETİMİ

řeklinde olur. Denklem (3.16)'ya benzer řekilde cismin dūřey doęrultudaki hızının karesi

$$\begin{aligned} \dot{z}^2(t) &= \frac{1}{\left(\frac{\rho g \pi D^2}{4}\right)^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \omega_n^4 \omega^2 |H(\omega)|^2 S_F(\omega) d\omega \\ &= \int_0^{\infty} \omega_n^4 \omega^2 |H(\omega)|^2 [f(kD)+1]^2 S_h(\omega) d\omega \end{aligned} \quad (3.21)$$

olarak ifade edilir. Tek serbestlik dereceli sistemlerde elde edilebilecek ortalama güç aşağıdaki ifadeden bulunur.

$$P_e = R_e \dot{z}^2(t) = \int_0^{\infty} R_e \omega_n^4 \omega^2 |H(\omega)|^2 [f(kh)+1]^2 S_h(\omega) d\omega \quad (3.22)$$

Denklem (3.22)'de verilen R_e terimi etkin direnci temsil etmektedir. Optimum durumlarda bu değerden doğan kayıplar en aza indirgenecek, yani sistem ulaşabileceği maksimum enerjiye ulaşacaktır. Bunu

$$\frac{d(P_e)}{dR_e} = 0 \quad (3.23)$$

şeklinde ifade etmekte mümkündür. Bir akışkanın içinde akışkanın yüzeyine dik olarak hareket eden bir sistem akışkandan dışa doğru bir enerji yayar. Bu enerji radyasyon enerjisi olarak adlandırılır ve (şekil 3.1)'deki gibi bir sistemde kaçınılması mümkün değildir. Denklem (3.23) ile ifade edilen değerin maksimum enerji olduğu ve bunun içinde radyasyon enerjisi de bulunduğuna göre sistemin yarattığı etkin direnç ile radyason dirençleri eşit olmalıdırlar. Yani:

$$R_e(\omega) = R_r(\omega) \quad (3.24)$$

Ancak bunu pratikte sağlamak imkansızdır. Teoride kullanılacak enerji spektrumlarının ampirik yaklaşımlar olduğu da göz önüne alınacak olursa radyasyon direncini bu enerji spektrumunun belli bir değerine göre almak da yanlış olmayacaktır. (Şekil 3.1)'deki enerji dönüşüm sisteminin optimum değerlerini belirleyebilmek için söz konusu sistemin kurulacağı bölgedeki deniz şartlarının belirlenmesi gerekir. Bunun için denklem (3.14)'te tarif edilen enerji spektrumunun doğal frekansını denklem (3.19)'daki dairesel doğal frekansa eşitlenmesi gerekir. Denklem (3.14)'teki Pierson-Moskowitz Enerji Spektrumu'nun doğal frekansı aşağıdaki gibi verilir.

$$\omega_n = \left(\frac{4B}{5} \right)^{1/4} \quad (3.25)$$

Bu durumda ilk yaklaşım olarak

$$\omega_s = \omega_n = \sqrt{\frac{\rho g \pi D^2}{4(m+a)}} = \left(\frac{4B}{5} \right)^{1/4} \quad (3.26)$$

yazılır.

3.3 MATEMATİKSEL MODELLERİN UYGULAMA ALANLARI

Yukarıdaki bölümde kullanılan formüller Şekil 3.1'deki hareketli su kolonu sistemine uygulanabilir.

McCormick, Trop ve Casey'in yaptıkları deneylerin sonuçlarından çıkardıkları [1] ek su kütlesi

$$a_\omega = \frac{\rho D_\omega^3}{3} \left[1 - \frac{1.3 k^2 D_\omega^2}{15} + \frac{k^4 D_\omega^4}{525} \right] \quad (3.27)$$

ile ifade edilirken radyasyon direnci kolonun çapı cinsinden

$$R_r = \frac{\rho \pi k^2 D_\omega^4}{32} \left[1 - \frac{k^2 D_\omega^2}{24} \right] e^{-2kl_\omega} \sqrt{\frac{g}{k} \tanh(kh)} \quad (3.28)$$

şeklinde tanımlanabilir. Bu ifade kaba olmasına karşın, bizim ihtiyacımıza cevap verebilecek bir yaklaşımdır. Durgun suda, kolon içinde bulunan su kütlesi basit olarak

$$m_w = \frac{\rho \pi D_\omega^2 l_\omega}{4} \quad (3.29)$$

ifadesiyle verilebilir. Yine durgun suda su kolonunun hareketinin doğal frekansını (3.26) denkleminde yola çıkarak

$$\omega_n = \sqrt{\frac{g}{l_\omega + \frac{4D_\omega}{3\pi} \left(1 - \frac{1.3k_n^2 D_\omega^2}{15} + \frac{k_n^4 D_\omega^4}{525} \right)}} \quad (3.30 \text{ a1})$$

şeklinde ifade etmek mümkündür. Bir dalga enerji spektrumunda doğal frekans

$$\omega_n = \left(\frac{4B}{5} \right)^{1/4} \quad (3.30 \text{ a2})$$

denkleminde ifade edilebilir. Bu doğal frekansa karşı gelecek dalga sayısı ise

$$k_n = \frac{\sqrt{\frac{B}{5}}}{\pi g \tanh(k_n h)} \quad (3.30 \text{ b})$$

şeklinde ifade edilebilir. Böylece dibe bağlı zincir ve farklı kütlelere sahip yüzer şamandıralar nedeniyle değişen su kolonu yüksekliği denklem (3.30 a1) ile (3.30 a2)'deki eşitlik kullanıldığında

$$l_w = \frac{g}{2} \sqrt{\frac{5}{B}} - \frac{4D_\omega}{3\pi} \left(1 - \frac{1.3k_n^2 D_\omega^2}{15} + \frac{k_n^4 D_\omega^4}{525} \right) \quad (3.31)$$

şeklinde tanımlanmış olur. Benzer şekilde denklem (3.24) ile ifade edilen etkin direnç ile radyasyon direnci arasındaki eşitlik göz önünde alındığında elde edilebilecek etkin direnç ile radyasyon dirençleri de doğal frekansa karşı gelen dalga sayısı yardımıyla

$$R_e = R_r = \frac{\rho \pi k_n^2 D_\omega^4}{32} \left[1 - \frac{k_n^2 D_\omega^2}{24} \right] e^{-2k_n l_\omega} \sqrt{\frac{g}{k_n} \tanh(k_n h)} \quad (3.32)$$

şeklinde ifade edilir.

Diğer taraftan bir spektrum sınırlı alandaki bir enerjiyi değil, çok geniş bir alanda elde edilen toplam enerjiyi ifade etmektedir. Örneğin denklem (3.17) Pierson-Moskowitz Enerji Spektrumu bir bölgedeki dalga enerjisini dairesel frekans cinsinden verirken sınırlı bir bölge tanımlanmasına izin vermez. Su derinliğini içeren bir enerji akışı ise denklem (3.18) ile verilmektedir. Spektrumların ifade aralıkları çok geniş olabileceği için onları incelenecek bölge için sınırlamakta fayda vardır. Bizim inceleyeceğimiz alan kolonun çapıyla sınırlı olduğu için bu enerjiyi kolon çapı cinsinden ifade etmek zorundayız. Böylece kolonun içindeki toplam güç

$$P_D = \frac{\rho g^2 D}{2} \int_0^\infty \frac{S_h(\omega)}{\omega} d\omega \quad (3.33)$$

şeklinde ifade edilir.

4. SONUÇLARIN MARMARA DENİZİ'NE UYARLANMASI

Bölüm 3'te dibe sabitlenmiş hareketli su kolonu sistemi için çıkarılan “Direnç Uyarlaması Yöntemiyle Optimizasyon Teorisi”ni Marmara Denizi'nde uygulayabilmek için öncelikle Marmara Denizi'ne uygun bir spektrumu uygulamak gerekmektedir. Seçilecek spektruma bağlı olarak bazı rüzgar hızlarının ya da karakteristik dalga yüksekliklerinin bilinmesi gereklidir. Marmara Denizi için karakteristik dalga yüksekliği bilinmediği için “Seyir ve Oşinografi Dairesi” ‘nden bazı dalga yükseklik dağılımları temin edilmiştir [Bkz. Ek B]. Bu değerlerden aylara göre en büyük ilk 30 dalga, ortalama dalga yükseklikleriyle çarpıldıktan sonra 30 a bölünerek aylara göre “karakteristik dalga yükseklikleri H_s ’ler” bulunur. [4] Aylık karakteristik dalga yüksekliklerinin ortalaması ise bütün yılın karakteristik dalga yüksekliğine karşı gelmektedir. Bu noktadan sonra Marmara Denizi'ne uygun olan ve karakteristik dalga yüksekliklerini kullanarak sonuca gidilebilecek olan “TTTC Dalga Enerji Spektrumu” kullanılmaktadır. [Bkz Ek – A] Buna göre Marmara Denizi için karakteristik dalga yüksekliği $H_s=1,2835$ m kullanıldığında $B=1,887855$ ve $A=0,77951241$ katsayıları bulunmaktadır. Bretschneider Spektrumu'na göre buna karşılık gelen doğal frekans denklem (3.26) kullanılarak $\omega_n = 1,10857$ saniye⁻¹ olarak bulunur.

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (4.1)$$

Denklemden buna karşılık gelen dalga periyodu $T = 5,6678$ saniye olarak bulunur. Bulunan bu periyot derin su kabulü yapılarak

$$\lambda = \frac{g T^2}{2\pi} \quad (4.2)$$

denkleminde yerine koyulduğunda dalga periyodu $\lambda=50$ metre bulunur. Derin su kabulünün sınır şartı gereği $h/\lambda \geq 0,5$ ‘ten $h \geq 25,077$ metre olarak bulunur. Yaklaşık olarak su derinliği $h=26$ metre olarak alınır.

İncelenecek sistemin bazı boyutlarını belirlemek için denklem (3.26)'da sistemin kütlesi m ile ek su kütlesi a eşit kabul edilerek denklem (3.26)

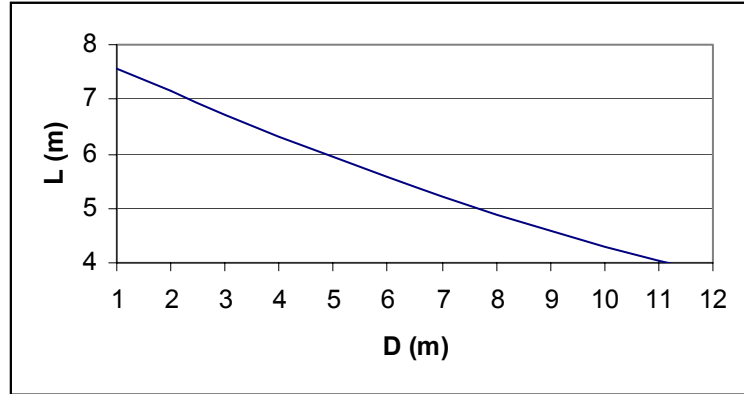
$$\omega_n = \sqrt{\frac{\rho g \pi D^2}{8m}} \quad (4.3)$$

olarak yazılır. Denklem (4.3)'te m yerine denklem (3.29) yazıldığında

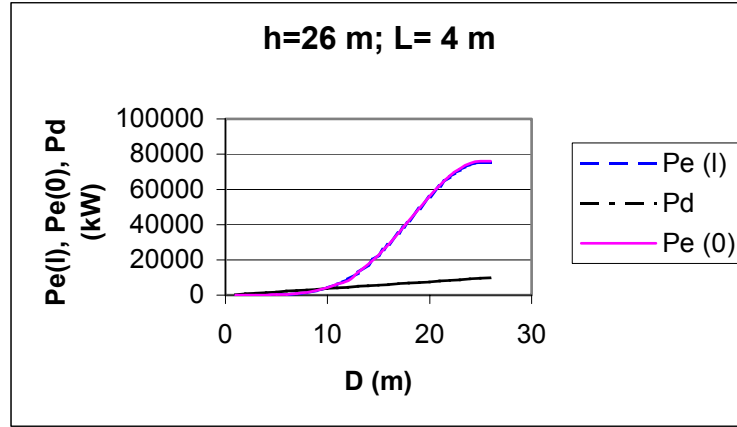
$$\omega_s = \sqrt{\frac{g}{2L}} \quad (4.4)$$

elde edilir. Denklem (4.4)'e daha önce denklem (3.26)'dan bulunan doğal frekans $\omega=1,10857 \text{ sn}^{-1}$ değeri koyulursa kolonun su altında kalan boyu $L=4$ metre olarak bulunur. Kolonun su altında kalan kısmı kolon içindeki su hacmini belirler. Yine aynı büyüklüğü belirleyen diğer bir değişken ise kolonun çapıdır. Bu iki büyüklük arasındaki ilişki denklem (3.31)'e uygun olarak şekil 4.1'deki gibi bulunur.

Şekil 4.1 Kolonun su altında kalan boyu L ile kolon çapı D 'nin değişimi

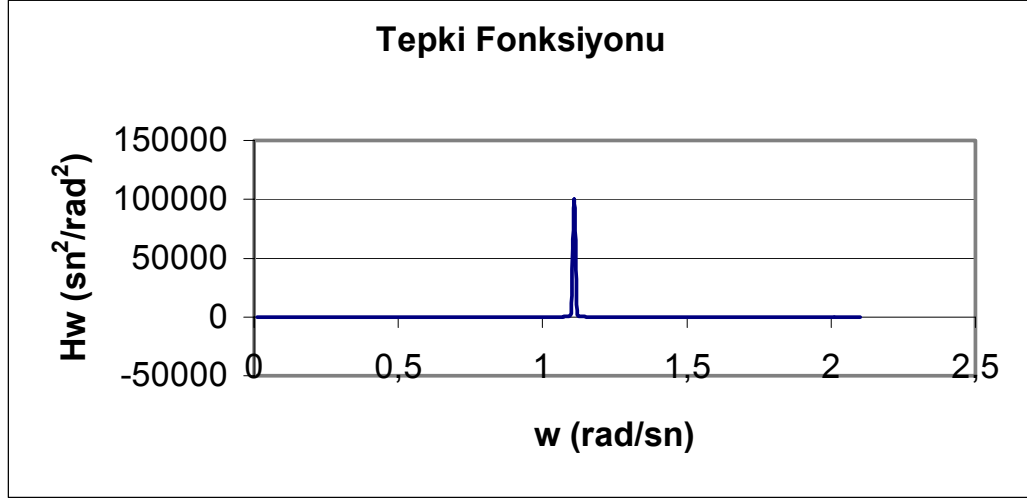


Şekil 4.1'den aynı gücü elde etmek için kolonun su altındaki boyunun kısılması durumunda kolon çapının büyümesi gerektiği anlaşılmaktadır. Daha önce kolonun su altındaki boyu $L=4$ m bulunduğuna göre bu değişkenlerden sadece kolon çapı bizim için değişken olarak söz konusudur. Kolon çapının değişmesiyle elde edilen güç Şekil 4.2'de gösterilmektedir.

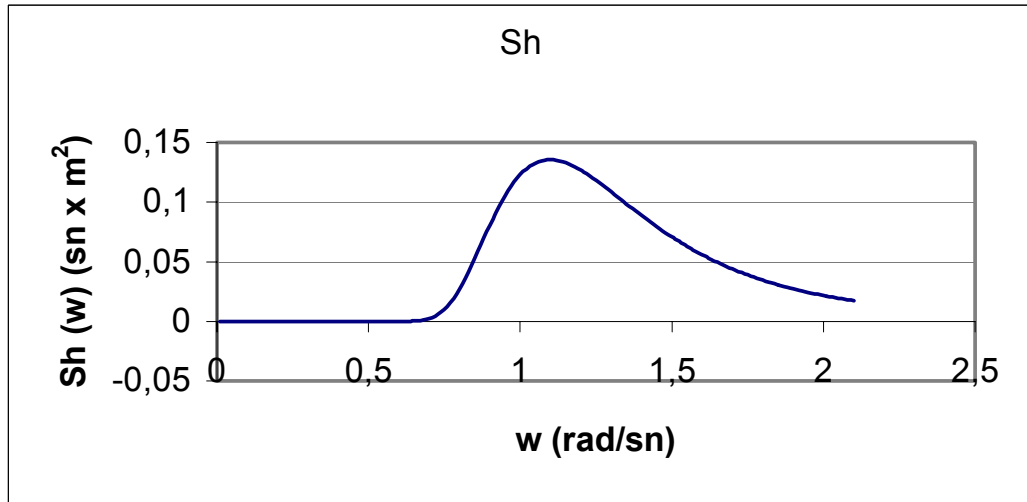


Şekil 4.2 Kolon çapı D'nin değişmesiyle ortaya çıkan güçler.

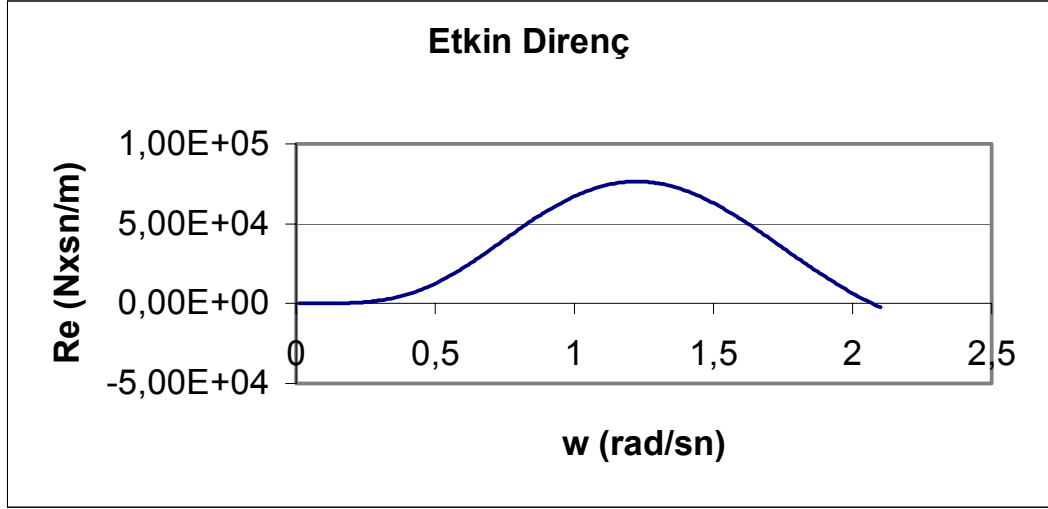
Şekil 4.2'de dalga gücü Pe iki farklı yerde gösterilmektedir. Bunlardan Pe(0) kolonun su içinde kalan alt açıklığındaki gücü, Pe(l) ise kolonun çektiği sudaki gücü ifade etmektedir. Şekil 4.2'ye göre dalga gücü Pd çapın artmasıyla doğru orantılı olarak artarken P(0) ve P(l) eğrilerinin artışı yaklaşık 10 metrelik bir çaptan sonra daha hızlı olmaktadır. Buna “anten odaklanması” denilmektedir [1]. Bunun iki nedeni vardır. Birincisi çapın küçük alınması durumunda optimizasyon tekniği gereği kolonun su altında kalan boyu L'nin büyük çıkması, ki bu Şekil 4.1'de de görülmektedir. Bu değer büyük çıkması sonucu dalga gücünün dinamik bileşeni $f(kh)$ düşmektedir. İkincisi ise dalga gücünün statik bileşeninin kolonun su hattı alanı ile orantılı olarak değişmesidir. Yani dalga gücü P_d 'nin çapın karesi D^2 ile değişimidir. Şekil 4.2'de güç $Pe(0)=0$ metrede $Pe(l)=4$ metrelik su kolonu boyu olarak alınmıştır. $Pe(0)$ 'ın $Pe(l)$ 'den daha büyük değerlere sahip olduğu görülmektedir. Bu kolonun çektiği suyun artmasıyla elde edilebilecek gücün kısmen azalması anlamına gelmektedir. Şekil 4.2'de kaydedilmesi gereken bir diğer nokta da kolon çapı D'nin 10 metreden küçük olması durumunda direnç uyarlaması yoluyla optimizasyon tekniğinden elde edilen verimin %100'ün altında olduğudur. Böyle bir durumda optimum kolon çapının ne olacağı merak konusudur. Bu çalışmada denklem (3.31)'de yukarıda bulunan $L=4$ metre kolon boyu kullanılmış ve kolon çapı $D=11,2$ metre bulunmuştur. Buna göre [Ek C]'de verilen bilgisayar programıyla yapılan hesaplar sonucunda elde edilen tepki fonksiyonu $H(\omega)$, derinlik etkisini de içeren spektrum $Sh(\omega)$ ve etkin direnç Re 'nin değişimleri aşağıdaki gibi elde edilmişlerdir.



Şekil 4.3 Tepki fonksiyonu H_w 'nin değişimi



Şekil 4.4 Derinlik etkisini de içeren spektrum S_h 'nin değişimi



Şekil 4.5 Etkin direncin değişimi

Şekil 4.3, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5 dikkatle incelendiğinde maksimum enerji dönüşümünün yaklaşık $\omega=1,1 \text{ s}^{-1}$ 'de gerçekleştiği görülmektedir. Şekil 4.3 incelenecek olursa tepki fonksiyonu bu frekans civarında maksimum olurken diğer hallerde sıfıra yakınsamaktadır. Bir diğer deyişle sistemde “anten etkisi” burada belirmeye başlar; yani sistem artık bir anlamda “rezonansa” girer. Şekil 4.4’den spektrumun dar bir bandında enerji dönüşümünün gerçekleştiği anlaşılmaktadır. Bu çıkarımı kullanılabilir enerjiyle orantılı olan etkin direncin değişiminin görüldüğü Şekil 4.5 de desteklemektedir. Bu nedenle teoriyi büyük piklerin ifade edildiği spektrumlardan çok “swell dalgaları” için oluşturulan ve geniş bir bandı kapsayabilecek bir spektrum için kurmak daha faydalı olabilecektir.

5. DALGA ENERJİSİNDEN ELEKTRİK ENERJİSİ ELDE ETMEDE KULLANILAN SİSTEMLERİN KAYIPLARI

Daha önceki bölümlerde farklı dönüşüm sistemleri tanıtılmağa çalışılmış, ancak bunların içerisinde en verimli olan olarak kabul edilen titreşimli su kolonu (OWC) göz önüne alınmıştır. Ayrıca verim teorik açıdan da incelenmiştir. Farklı dönüşüm sistemlerinin değişik sorunları üzerinde kısaca durulmuş olsa da esas sorun teşkil edecek kısım sistemdeki kayıp değerleridir. Kayıp değerleri temelde yapılacak bir proje içerisinde ekonomik açıdan hangi malzemenin kullanılabileceğine ve seçilen sisteme, sistemin kurulacağı bölgeye vs. bağlıdır. Bu nedenle bu çalışmada kayıp değerlerinin mertebesi hakkında sayısal bir fikir vermekten çok, kayıpların nerelerde oluşabileceklerine dair bir fikir verilmeye çalışılmaktadır. Temel kayıpları herşeyden önce sistemde kullanılacak jeneratör tipleri belirler.

Dalga enerjisi dönüşüm sistemlerinde başlıca iki farklı jeneratör tipinden söz etmek mümkündür. Bunlardan ilki bölüm 1.4'deki Pelamis Enerji Dönüşüm Sistemi'nde anlatılan ve içinde bir hidrolik yağının yer değiştirmesiyle enerji üreten tiplerdir. Bu tip jeneratörler içerisindeki akışkanın bir bölmeden diğerine geçmesi ile enerji üretebildiklerinden dolayı verim eğrileri sürekli değildir. Bu nedenle birçok sistemde bu tip jeneratörler bilinçli olarak tercih edilmemektedirler. İkinci tip jeneratör ise içinde bir veya birkaç adet mıknatıs ve en az bir adet sarmal bobin bulunan ve manyetik alan değişiminden faydalanarak elektrik enerjisi üreten tiptir. Bu tip jeneratörler çok yaygındır. Özellikle ufak bir benzinli ya da dizel motorunun tahriki ile hastane, ev, iş yerleri, otomobiller, deniz vasıtaları vs. gibi yerlerde elektrik ihtiyacını karşılamaktadırlar. Bu jeneratör tipi bu çalışmada özel bir yeri olan hareketli su kolonunda kullanılabilecek tek jeneratör tipidir. Bu tip jeneratörlere “elektromanyetik jeneratör tipi” demek hiç yanlış olmayacaktır.

Ancak kayıplardan önce teori kısmında ele alınmış olan kabuller ve bunların doğaya ne derece uygun olduklarını ele almak ve teorik olarak üretilebilecek maksimum enerjiyi gerçekçi biçimde değerlendirmek gerekmektedir. Bu çalışmada sabitlenmiş ve sabitlenmemiş titreşimli su kolonu olmak üzere iki farklı teori incelenmiştir. Kabuller farklı olduğundan, farklı sonuçlar elde edilmektedir. Teorileri birbirleri ile karşılaştırmak için aynı bileşenleri kullanarak her iki teorinin vereceği sonuçları incelemek gerekmektedir. Ancak bölüm 2'deki teoride dalga yüksekliği, periyot, kolon çapı, dalganın kaçınıcı saniyesini hesap etmek istediğiniz vs gibi veriler gerekirken sabitlenmiş sistemin incelendiği teoride sadece dalga yüksekliği, karakteristik dalga yüksekliği, kolon çapı ile su yoğunluğu gerekmektedir. Teorilerin farklı veriler gerektirmesi nedeniyle her iki teoriyi de aynı bölgeye uygulamak en mantıklı çözümdür. Ancak Marmara Denizi için verilerin son derece yetersiz olması sebebiyle özellikle bölüm 2'deki teoriye uygun hesap yapılmak istendiğinde parametreler belirlenememektedir. Bu nedenle özellikle Marmara Denizi'nin derinlik, karakteristik dalga periyodu, dalga yüksekliklerinin ve periyotlarının mevsimlere göre incelenmesi gerekmektedir.

5.1 SABİTLENMEMİŞ TİTREŞİMLİ SU KOLONU'NUN LİNEER TEORİDE İNCELENMESİ'NİN SONUÇLARI

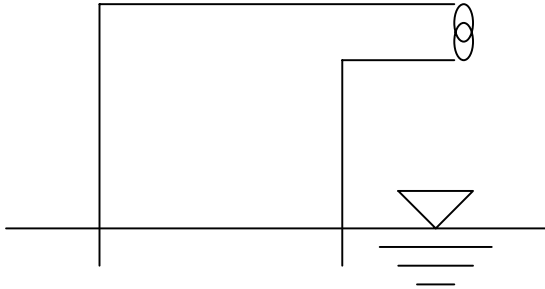
- Teori lineerdir ve sisteme gelen sayfa düzlemine dik ve yatay hızları ihmal edilmektedir.
- Sistem maksimum enerjiye sistemin doğal frekansının dalganın frekansına eşit olması halinde ulaşmaktadır.
- Teori gereği elde edilen güç dalga yüksekliğinin üçüncü kuvvetiyle orantılıdır.
- Hava sıkıştırılmaz bir akışkan olarak kabul edilir.
- Teori'de yer alan “kayıp katsayıları” farklı direnç ve kayıp değerlerinin toplanmasından oluşur ve hesabı mümkün değildir. Gerçekçi bir değer ancak tecrübelerden elde edilebilir.

5.2 SABİTLENMİŞ TİTREŞİMLİ SU KOLONU'NUN OPTİMİZASYON TEORİSİ'NE GÖRE ELDE EDİLEN SONUÇLARI

- Sönüm katsayısının bir bileşeni olan viskoz direnç ihmal edilmektedir. Daha hassas sonuçlar elde etmek için bu bileşen mutlaka hesaba katılmalıdır.
- Kullanılabilir enerji (kullanılabilir direnç) ile radyasyon direnci eşit kabul edilmektedir ki bu durum doğada mümkün değildir çünkü sönüm kuvvetinin diğer bir bileşeni olan viskoz direnç ihmal edilmiştir.
- Ek su kütlesi ve radyasyon direnci gibi değerler ampirik yaklaşımlardır. Bu yaklaşımların doğruluğu deneysel sonuçlarla karşılaştırılmalıdır. Ek su kütlesi için verilen ampirik değer birçok durumda deneysel sonuçlarla uyuşmaktadır. Ancak radyasyon direnci için verilen ampirik formül çok kaba bir yaklaşımdır. Bunun nedeni olarak söz konusu terimin teoride lineer olarak verilmiş olması denilebilir. Oysa deneysel sonuçlarda lineer olmayan bileşenlerin de etkileri bulunmaktadır.
- Optimizasyon tekniği gereği sistemin doğal frekansı dalga frekansına eşit olduğunda teori maksimum enerjiyi verir. Bu da spektrumun pik değerinde maksimum enerji dönüşümü demektir. Gerçekte bu pik değerleri çok dar bir enerji bandında gerçekleşir. Bu kabul yerine geniş bantlı bir spektrumu kullanarak daha geniş bir enerji bandında enerji dönüşümünü incelemek daha verimli olacaktır.
- Teori gereği dalga gücünün dinamik bileşeni $f(kh)$ ile statik bileşeni çapın karesiyle orantılıdır. Bu nedenle belli bir çaptan sonra elde edilebilecek güç miktarı dalga gücünün üstüne çıkar. Bu doğadaki duruma uymadığı için kullanılabilir gücün artışı hızlanmaya başladığında teorinin sınırlarına gelindiği anlaşılmalıdır.
- Kolonun su altındaki uzunluğu arttıkça aynı enerji daha küçük çaplarla elde edilebilmektedir. Ancak derin su kabulü yapıldığı için kolonun su altındaki boyu L 'nin bölgedeki suyun dalga boyunun yarısını geçmemelidir. Denklem (3.31)'den de bu boya karşılık gelen kolon çapı bulunabilmektedir. Böylece kullanılacak sistemin boyutlarının sınırları da belirlenmektedir.

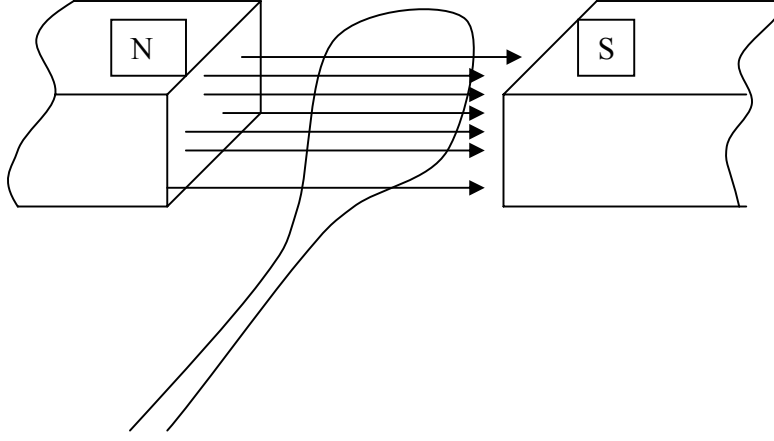
5.3 ELEKTROMANYETİK JENERATÖRLERİN TİTREŞİMLİ SU KOLONU İLE BİRLİKTE KULLANIMI

Hareketli su kolonu sisteminin tek hareketli parçası olan türbinin dönmesiyle jeneratöre hareket iletilmesi sırasında kullanılacak bir şaft söz konusudur. Bu şaftın gerek türbine bakan ucuna, gerekse jeneratöre bakan kısımlarına birer adet kaplin koyulmalıdır. “Şekil 3.1” ‘de jeneratör türbinin üzerinde yer almaktadır. Bu şekilde kurulan bir sistemde şaft çok fazla uzun değilse şaftın aksel gerilmelerinin şaftın çökmesine neden olmayacağı düşünülebilir. Ancak sistemin suda sabit durmayıp salınım yaptığı ve sistemin ağırlık merkezinin neredeyse hiçbir zaman sabit durmadığı düşünüldüğünde bu şaftın da çökebileceği göz önüne alınmalıdır. Şaftın çökmesi deformasyona uğraması, veriminin düşmesi anlamına gelir. Deforme olan şafta bağlı olan kapline gelen yük kaplin merkezinin bir tarafında artarken diğer tarafında azalır, dolayısıyla oluşan gerilmeler kaplin verimi ve ömrünü kısaltır. Bunun bir nebze önlenmesi için kaplinlerin elastik olarak yapılmalarında fayda vardır. Şaft biraz uzun tutulacak olursa çökmelerin önüne geçmek için mutlaka bazı noktalardan yataklanmalıdır. Şekil 5.1.1’deki gibi yer alan bir türbine bağlanacak olan şaftın ekseni de yatay olacağı için bu tip şaftlar mutlaka yataklanmalıdır.



Şekil 5.1.1 Merkez eksenli yatay olarak yerleştirilmiş bir türbinin hareketli su kolonunda kullanılması

Jeneratör tarafındaki elastik kaplin bir alternatöre bağlanır. Jeneratörün içinde mıknatıs ve sarımlı bobin bulunduran ve elektrik üreten parçanın adı alternatördür. Alternatörün çalışma prensibini anlamak için “Şekil 5.1.2” incelenmelidir.



Şekil 5.1.2 Bir alternatörün temel çalışma prensibi

Alternatör temelde iki mıknatıs arasında sürekli olarak yer değiştiren bir telden ibarettir. Tel manyetik alan içinde yer değiştirmesi nedeniyle devamlı değişen bir manyetik alan değeriyle karşı karşıya kalır ve

$$\mathcal{E} = \omega B A \sin(\omega t)$$

ile ifade edilen indüsiyon meydana gelir. Bu denklemde A telin manyetik alan değişimine uğrayan yüzeyini, B manyetik alan değerini, ω ise açısal hızı ifade eder. Telin yerine birçok tel anlamına gelen sarımlı bir bobin kullanımında ise sarım sayısı önem kazanmaktadır. Sarım sayısına bağlı olarak yukarıdaki denklem bir katsayı ile çarpılarak alternatörden elde edilecek enerji bulunabilecektir. Şekil 5.1.2'deki telin kendi ekseninde bir tam dönüşü sırasında üzerinde oluşan akım telin iki mıknatıs kutbu arasında daima paralel olan manyetik alan çizgileri ile yaptığı açı gereği iki farklı yönde olacaktır. Yani akım yön değiştirecektir. Bu, alternatörden elde edilen enerjinin alternatif akım karakteristiğinde olacağı anlamına gelmektedir. Bu şekilde üretilen bir alternatörde dönen parça olan bobin rotor, sabit duran mıknatıslar ise stator adını almaktadırlar.

Hareketli su kolonunda alternatör içinde yer alan rotora hareketi ileten türbinin dönme hızı tamamen tabiyata bağlıdır. Zaman zaman çok yavaş dönüp rotora kayda değer bir hareket iletemeyen türbin kimi zamanlarda rotorun çok büyük hızlarla dönmesine sebep

olabilir. Rotorla iletilen düşük açısal hızlar elektrik enerjisi üretimine engel olurken yüksek açısal hızlar sistemde yer alan hassas parçaların bozulmalarına sebep olabilirler. Özellikle rotora gelen yüksek açısal hızı önlemek için belli bir açısal hızın üzerine çıktığında kendiliğinden devreye giren ve rotora iletilen açısal hızı düşüren bir redüksiyon dişli sisteminin (reduction gear) jeneratör tarafında bağlanan kapline bağlanmasının düşünülməsi gereklidir.

Hareketli su kolonu sisteminde sürekli olarak türbin rotora aynı açısal hızı iletemeyeceği için rotor farklı zamanlarda farklı açısal hızlarla dönecek, dolayısıyla üreteceği akım “düzensiz” bir alternatif akım olacaktır. Bugün Avrupa’da şehir şebekelerinde üretilen cırcı 220V – 50 Hz. alternatif akımdır. Oysa rotorun farklı hızlarda dönmesi indüklenecek gerilimin ve bu gerilimin yarattığı akımın frekansının değışken olmasına sebep olacaktır. Bu durumda bu enerji hiçbir elektriksel aletle kullanılamayacak, onları çalışamaz hale getirecektir. Bu nedenle alternatörde üretilen akım önce bir “diyod rektifikatörü”nden (diode rectifier) geçirilerek doğrultulur. Doğru akıma dönüştürülen enerji bir “tristör invertörü”nde (thyristor inverter) tekrar alternatif akıma çevrilir. Ancak bu sefer üretilen alternatif akım düzenlidir. Tristör invertöründen sonra elde edilen alternatif akımı duruma göre artıran ya da azaltan bobinlere ihtiyaç vardır. Üçgen yapıda olup birbirlerine seri olarak bağlanan bobinler akımı artırırken üçgen yapıda olup herbiri merkezde bağlı ancak diğır uçları açıkta bulunan bobinler akımı azaltır. Hangi bobine ne zaman akım verileceğine ise diyod rektifikatörü ile tristör invertörü arasında enerji nakleden hatta paralel olarak bağlanan ve gerek diyod rektifikatörünü gerekse tristör invertörünü aynı anda kontrol ve kumanda eden bir kontrol ünitesi karar vermektedir. Bu şekilde belli bir akım seviyesi, dolayısıyla gerilim aralığı ile belli bir frekans aralığı sağlanmış olur ve bu enerji gerek şehir şebekesini beslemek için, gerekse bazı elektriksel aletleri harekete geçirmek için kullanılabilir. İstenirse üretilen ve akımı düzenlenen elektriğin jeneratörden dışarıya verilmeden hemen önce bir kısmı rotora düşük açısal hız iletimi olduğunda takviye olarak kullanılabilir. Bu durumda rotora konulacak ve rotorun açısal hızını ölçecek bir sensörün bir mikro işlemciyle haberleşmesi sonucu rotora gereken enerji miktarını belirleyip bunu kontrol ünitesine haber verecek bir yapı da düşünülmelidir.

SONUÇ

Günümüz itirabıyla henüz şehir şebekesini destekleyecek kadar verim elde edebilecek bir dalga enerjisi dönüşüm sistemi yapılamamıştır. Yapılan çalışmaların bir kısmı açık denizde olduğu için 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 pek ekonomik olamamaktadır. Bu nedenle dalga enerjisi dönüşüm sistemleri karaya yakın, mümkünse karada yer almalıdırlar. Karada yer alan tek sistem olan Tapchan Enerji Dönüşüm Sistemi'nin sorunları 1.bölümde açıklanmıştı. Hareketli su kolonu ise karaya çok yakın ya da Tofteshallen'deki (Norveç – Bergen yakınları) çok yüksek kayalıkların yamacına yapılan ve “karada kurulu” kabul edilebilecek bir sistemdir. Bu şekilde bu sistemlerin denizli havada parçalanmalarının biraz olsun önüne geçilmiştir. Şekil 4.2'de seçilen boyutlarla sistemin dönüştürebileceği maksimum enerji miktarları verilmektedir. Bu değerler maksimum frekansa karşı gelenler olup aynı şartların sürekli olarak var olmaları halinde bu değerlerin yaklaşık %60-%70 'inin türbini döndürecek enerjiyi oluşturacağını göz önünde bulundurmamak gerekir. Ancak türbinin eksenini etrafında dönmesiyle türbin eksenindeki sürtünmeden ve türbinin kanatlarının dönüştüremeden kaçırdığı enerjiden doğan kayıplar türbinin kapline iletebileceği enerjiyi azaltmaktadır. Kullanılacak kaplinlerin boyut, malzeme ve bağlantıları ile şaft ve şafta yataklarının malzemesi, işçiliği ve uzunlukları gereği de bir kayıp söz konusudur. Isının artması demir, bakır gibi elektrik iletkenlikleri yüksek madenlerin bu özelliklerinin azalmasına sebep olduğu bilinmektedir. Alternatör içinde yer alan rotorun dönmesiyle rotor yataklarının ısınması elektrik üreten ve sistem içinde ileten parçaların verimliliklerini düşürmektedir. Bu nedenle aşırı ısınmaya karşı bir önlem alınması gerekir. Bu bir soğutma fanı olabilir. Ancak fanın dönmesi için gerekli enerji de

yine sistemin kayıplar hanesinde yerini alacaktır. Diyod rektifikatöründe, tristör invertöründe ve akım artırıcı ve azaltıcı bobinlerde yine ısınma görülecektir. Bunların herbirini teker teker soğutmak mümkün olduğu gibi jeneratörün ufak olması halinde bunlar da rotorla birlikte aynı fanla soğutulabilirler. Özellikle jeneratör büyüdükçe ısınan her parçayı ayrı ayrı ele alıp soğutmak ve diğer parçalardan izole etmek akıllıcadır. İzolasyonun yapıldığı yere, izolasyonun türüne ve işçiliğe bağlı enerji kayıpları da olabilecektir. Ancak bu kayıplar ısının artmasıyla doğan kayıplardan az olacaktır. Jeneratör içinde yer alacak kontrol ünitelerinin ve mikro işlemcilerin kullanacakları enerji de kayıptır. Şehir şebekesine iletim esnasında kullanılan kabloların türleri, kalınlıkları ve geçtikleri yerlerdeki hava nemi, sıcaklığı, varsa rüzgar hızı gibi bileşenler de elde edilecek enerjiden kayıp vermek anlamına gelmektedir.

Özetle kayıplar:

- Teorinin sadece maksimum değerlere yer vermiş olmasından
- Türbinin kendi eksenini etrafında dönmesiyle eksenindeki türbin yataklarında meydana gelen sürtünme ile türbinin ataletinden doğan kayıplar
- Kaplinlerin boyutları, malzemeleri ve bağlantıları nedeniyle oluşan kayıplar
- Şaft yataklarının boyutlarından ve sürtünmelerinden ve doğan kayıplar
- Şaftın malzeme, işçilik ve boyutlarından gelen kayıplar
- Rotor yataklarının ısınması sonucu metal parçaların iletkenliklerinin azalması nedeniyle doğan kayıplar
- Soğutucu fanların çalışmaları için çektikleri enerjiden doğan kayıplar
- İzolasyon malzemesi ve işçiliğinden dolayı gelen kayıplar
- Jeneratör içinde kullanılan kabloların dirençlerinden doğan kayıplar
- Jeneratör içinde kullanılan kontrol üniteleri ile mikro işlemcilerin çektikleri enerjiden doğan kayıplar
- Şehir şebekesini beslemek için döşenen kabloların kalınlıklarından, malzemelerinden ve bu kabloların yolları üzerindeki nemden ve ısıdan doğan kayıplar

Sonuç olarak bir proje yapılmadan ve yukarıda sayılan kayıpların mertebeleri hakkında bir fikir sahibi olmadan hareketli su kolonu sisteminin Marmara Denizi için

uygulanabilirliği konusunda olumlu bir ifadede bulunmak güçtür. Yukarıda sayılan kayıpların en iyimser bir tahminle türbine gelen enerjinin %40'ını oluşturacağı söylenebilir. Şekil 4.2'den türbine iletilebilen gücün $D=11$ metre için $P_d=6300$ kW olarak alınması halinde kayıpları kabaca yukarıda belirtilen şekilde alacak olursak elektrik enerjisine dönüştürülebilecek enerji miktarının 200 kW civarında olacağı düşünülebilir. Bu durumda yapılacak bir projede tam bir maliyet çıkarılıp birim enerjinin bedeli hesaplanmalı ve başka enerji kaynaklarıyla karşılaştırılmalıdır.

KAYNAKLAR

- [1] **McCormick, Michel E.**, 1983. Analysis of Optimum Ocean Wave Energy Conversion, *Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering*, 109, 180-198.
- [2] **McCormick, Michel E.**, 1983. Analysis of a Wave Energy Conversion Buoy, *Journal of Hydronautics*, 8, 77-82.
- [3] **Bak, U.**, 1999. Dalga Enerjisinden Elektrik Elde Edilmesi, *Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi, İstanbul.
- [4] **Sabuncu, Tarık**, 1993. *Gemi Hareketleri*. İ.T.Ü Gemi İnşaatı Fakültesi Ofset Atölyesi, İstanbul.
- [5] **Ross, David**, 1995. *Power From the Waves*. Oxford University Press, New York.
- [6] **Tucker, M. J.**, 2001. *Waves in Ocean Engineering*, Elsevier, New York.

EK A

PIERSON –MOSKOWITZ DALGA SEPKTRUMU

Pierson ve Moskowitz tarafından 1964 yılında yayımlanmış yarı ampirik enerji spektrumudur. Spektrum genel halde

$$S_{\zeta\zeta} = \frac{A}{\omega^5} \exp\left(-\frac{B}{\omega^4}\right)$$

ya da daha açık bir formda

$$S_{\zeta\zeta}(\omega) = \frac{8,1 \cdot 10^{-3} \cdot g^2}{\omega^5} \exp\left(-0,74 \cdot \left(\frac{g}{\omega V_\omega}\right)^4\right)$$

şeklinde ifade edilir. İfadedeki V_ω deniz yüzeyinden 19 metre yükseklikte (metre/saniye) cinsinden rüzgar hızını ifade etmektedir. g ise yer çekimi ivmesi olup genelde 9,81 (metre/saniye²) olarak alınır. Spektrum maksimum değerine $\omega_{\max} = (0,8 \times B)^{1/4}$ olduğu zaman erişir.

BRETSCHNEIDER DALGA SEPKTRUMU

Bretschneider Dalga Spektrumu aslında Pierson-Moskowitz Spektrumu'nun düzenlenmiş şeklidir. Sistemde farklı olarak varyans kullanımı söz konusu olmakta, bu da bazı katsayıları dolayısıyla denklemi değiştirmektedir. Varyans spektrumu 0 ile sonsuz arasında integre ederek elde edilen toplam enerjiye, yani spektrumun toplam enerjisine karşılık gelir ve aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\sigma^2 = M_0 = \frac{A}{4 * B}$$

Bu denklemden A katsayısı çekildiğinde ise

$$A = 4 * \sigma^2 * B$$

değeri elde edilir. B katsayısı ise

$$\omega_m^4 = \frac{4 * B}{5}$$

denklemden

$$B = \frac{5 * \omega_m^4}{4}$$

olarak bulunur. Bu ifadeler Pierson-Moskowitz Denklemi'nde yerine konulduğunda

$$S(\omega) = 5 * \frac{\omega_m^4}{\omega^5} * \sigma^2 * \exp \left[-\frac{4}{5} * \left(\frac{\omega_m}{\omega} \right)^4 \right]$$

ifadesi elde edilir. Sistemin karakteristik dalga yüksekliklerinin spektrumun %60'ından daha dar bir enerji bandında meydana geldiği düşüncesiyle $\varepsilon < 0,6$ için

$$\zeta = H_{1/3} = H_s = 4 \sqrt{M_0} = 4 * \sigma$$

yazılabilir. Bu denklemden varyans terimi çekilir ve değeri dalga yüksekliği cinsinden yukarıdaki denkleme yazılırsa Bretschneider Dalga Spektrumu ifadesi aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$S(\omega) = \frac{5}{16} * \frac{\omega_m^4}{\omega^5} * \zeta^2 * \exp \left[-1,25 * \left(\frac{\omega_m}{\omega} \right)^4 \right]$$

I.T.T.C DALGA SPEKTRUMU

1969'da Roma'da 12inci "Uluslararası Çekme Tank Konferansı"nda (International towing Tank Conference) denizler için deniz yüzeyinin 19 metre üzerinde rüzgar hızının her yer için verilemeyeceği, ancak karışık denizlerin karakteristik dalga yüksekliklerinin bilinmesi sebebiyle farklı bir spektrum önerilmiştir. Bu spektrumda kullanılan katsayılar

$$A=8,1*10^{-3}*g^2$$

ve

$$B=\frac{3,11}{H_{\frac{1}{3}}^2}=\frac{3,11}{H_s^2}$$

olarak ifade edilir. A katsayısı Pierson-Moskowitz spektrumundaki değer olup bu spektrumda rüzgar hızı cinsinden ifade edilen B katsayısı değiştirilmiş, yerine karakteristik dalga yüksekliği H_s 'in kullanıldığı bir katsayı önerilmiştir. Böyle ITTC Dalga Spektrumu

$$\begin{aligned} S_{\zeta\zeta}(\omega) &= \frac{A}{\omega^5} * \exp\left(-\frac{B}{\omega^4}\right) = \\ &= \frac{8,1*10^{-3}*g^2}{\omega^5} * \exp\left(-\frac{3,11}{H_s^2*\omega^4}\right) \end{aligned}$$

olarak verilmektedir. ITTC'de bu spektrumun Pierson-Moskowitz Dalga Spektrumu'na rakip olması açısından rüzgar hızı bilinen yerlerde denkleme uyarlanması için aşağıdaki değerler tavsiye edilmiştir.

V_w	H_s
20	3,1
30	5,1
40	8,1
50	11,0
60	14,6

JONSWAP DALGA SPEKTRUMU

Pierson-Moskowitz Dalga Spektrumu'nun dalganın dairesel frekansı ω yerine sadece frekans f kullanılarak elde edilen bir türüdür. Bunu için

$$S(\omega) \rightarrow S(f)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$

dönüşümü yapılır. Pierson-Moskowitz Spektrumu'nun maksimum değeri

$$S(\omega) = \frac{0,0081 * g^2}{\omega^5} e^{-1,25 \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^4}$$

olarak verilmektedir. Buradaki ω_0

$$\omega_0 = 0,161 \frac{g}{H_s}$$

değeri ile ifade edilir. H_s terimi karakteristik dalga yüksekliğine karşılık gelir. Pierson-Moskowitz Spektrumu'nun maksimum değerini dairesel frekansı ω yerine f frekans değerinden yazılması durumunda

$$\sigma^2 = m_0 = \int_0^{\infty} S(\omega) d\omega = 2\pi \int_0^{\infty} S(f) df$$

bulunur. Burada $d\omega = 2\pi df$ dönüşümü yapılır. Bu durumda Pierson-Moskowitz Spektrumu'nun son hali

$$S(f) = \frac{0,0081 g^2}{(2\pi)^4 f^5} e^{-1,25 \left(\frac{f}{f_0} \right)^4}$$

olarak ifade edilmektedir. Buradaki 0.0081 terimi Pierson-Moskowitz Spektrumu'nda kullanılan bir katasayı olup Jonswap Spektrumu'nda bu sabit yerine

$$\alpha = 0,076 \left[\frac{g F}{U_{10}^2} \right]^{-0,22}$$

olarak verilir. Burada g yerçekimi ivmesini ($9,81 \text{ m/sn}^2$), F fetch mesafesini metre cinsinden, U_{10} ise 10 metre yükseklikteki rüzgar hızını ifade etmektedir. Bu değişikliğin

yanında Jonswap Spektrumu frekans cinsinden yazılmış Pierson-Moskowitz formülünün tamamını

$$C = \gamma e^{\frac{(f-f_p)^2}{2\sigma^2 f_p^2}}$$

ile çarparak elde edilir. Burada

$$\sigma = \begin{cases} f \leq f_p & \text{ise } \sigma_a = 0,07 \\ f > f_p & \text{ise } \sigma_b = 0,09 \end{cases}$$

olarak alınır. Böylece Jonswap Spektrumu

$$E(f) = \frac{\alpha C g^2 e^{-1,25 \left(\frac{f}{f_p}\right)^4}}{(2\pi)^4 f^5}$$

olarak yazılır.

ISSC DALGA SPEKTRUMU

Bu spektrum Piersson-Moskowitz Spektrumu'ndaki A ve B katsayılarının karakteristik dalga yüksekliği ve periyodu cinsinden yazılması ile elde edilir. Yani

$$A = \frac{173 H_s^2}{T_1^4} \quad B = \frac{691}{T_1^4}$$

Burada T_1 ile ifade edilen terim karakteristik dalga yüksekliği H_s 'e denk gelen karakteristik dalga periyodudur. Karakteristik dalga periyodu

$$T_1 = 2\pi \frac{m_0}{m_1}$$

olarak verilir. Bu ifadedeki m_0 ve m_1 değerleri spektrumun sıfıncı ve birinci momentlerin karşılık gelir ve

$$m_n = \int_0^{\infty} \omega^n \Phi_{\zeta\zeta}(\omega) d\omega$$

şeklinde ifade edilir. Burada

$$S_{\eta\eta_{\max}} = 0,65 e^{-\frac{5}{4} H_s^2 T_1}$$

olup dairesel frekansın maksimum değeri $\omega_{\max} = 4,85/T_1$, karakteristik dalga periyodu $T_1 = 3,86\sqrt{H_s}$ ile ifade edilir.

EK – B

Seyir Hidrografi ve Oşinografi Dairesi Başkanlığı 1999 Raporu.
Marmara Denizi’nin Rüzgar ve Dalga Durumunun Değerlendirilmesine İlişkin Rapor

Aylar Dalga Yüksekliği	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
<=0,6 m	51,0	69,4	72,6	84,2	84,3	92,7	82,5	63,6	76,3	78,8	71,4	71,5
0,9-1,2 m	20,4	21,5	18,5	9,8	12,2	6,3	14,6	23,2	14,4	10,6	17,6	16,5
1,5-1,8 m	15,3	4,2	5,2	3,7	2,6	1	1,9	6,1	7,2	3	0	5,5
2,1-2,7 m	9,2	4,1	2,9	2,3	0,9	0	1	0	1,4	6,8	8,8	3,7
3,0–3,6 m	3,1	0,8	0,8	0	0	0	0	7,1	0,7	0	1,1	2,8
=>3,9 m	1,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,8	1,1	0

EK – C

**TİTREŞİMLİ SU KOLONU İÇİN OPTİMİZASYON TEORİSİ'NE GÖRE
YAPILMIŞ BİLGİSAYAR PROGRAMI**

Private Sub Command1_Click()

H = Val(Text1)

A = Val(Text2)

B = Val(Text3)

g = Val(Text4)

ro = Val(Text5)

D = Val(Text6)

L = Val(Text7)

pi = 22 / 7

Open "frekans" For Output As #1

Open "spektrum" For Output As #2

Open "cevap" For Output As #3

Open "direnc" For Output As #4

wn = (4 * B / 5) ^ (1 / 4)

kn = wn ^ 2 / g

Pds = 0

Pes = 0

For I = 1 To 210

w = I / 100

k = w ^ 2 / g

X = k * H

XL = k * L

Y = kn * H

sinh = (Exp(X) - Exp(-X)) / 2

sin2h = (Exp(2 * X) - Exp(-2 * X)) / 2

cosh = (Exp(X) + Exp(-X)) / 2

coshl = (Exp(XL) + Exp(-XL)) / 2

tanh = (Exp(X) - Exp(-X)) / (Exp(X) + Exp(-X))

tanhkn = (Exp(Y) - Exp(-Y)) / (Exp(Y) + Exp(-Y))

'Pd için:

spek = (A / (w ^ 5)) * Exp(-B / (w ^ 4))

sh = Abs((1 + (2 * X / sin2h)) * tanh * spek)

```
shpd = sh / w
Pds = Pds + shpd
```

'Pe için:

```
aw = ro * D ^ 3 / 3 * (1 - (1.3 * k ^ 2 * D ^ 2 / 15) + (k ^ 4 * D ^ 4 / 525))
m = ro * pi * D ^ 2 * L / 4
```

```
Lw = (g / 2 * Sqr(5 / B)) - (4 * D / (3 * pi) * (1 - (1.3 * kn ^ 2 * D ^ 2 / 15) + (kn ^ 4 * D ^ 4 / 525)))
Rr = ro * pi * k ^ 2 * D ^ 4 * Exp(-2 * k * Lw) * (1 - (k ^ 2 * D ^ 2 / 24)) / 32 * Sqr(g * tanh / k)
fkD = (1 - (k ^ 2 * D ^ 2 / 32)) * (cosh - coshl) / cosh
```

'Cevap Fonksiyonu:

```
HA = 1 - (w / wn) ^ 2
HB = 2 * Zeta * (w / wn)
Hw = Abs((HA ^ 2 + HB ^ 2 + 4 * HA * HB) / (wn ^ 4 * (HA ^ 2 + HB ^ 2) ^ 2))
Pehazir = Rr * wn ^ 4 * w ^ 2 * Hw * (fkD + 1) ^ 2 * sh
```

```
Write #1, (w)
Write #2, (sh)
Write #3, (Hw)
Write #4, (Rr)
```

```
Pes = Pes + Pehazir
```

Next I

```
Pd = ro * g ^ 2 * D * Pds / 2
Label7.Caption = Pd
```

```
Label13.Caption = Lw
Label14.Caption = Pes
```

```
Close #1
Close #2
Close #3
Close #4
```

End Sub

```
Private Sub Command2_Click()
End
End Sub
```

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DALGA ENERJİSİNDEN ELEKTRİK ENERJİSİNE
DÖNÜŞÜM SİSTEMLERİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Müh. Ufuk BAK**

Anabilim Dalı : DENİZ TEKNOLOJİSİ MÜHENDİSLİĞİ

Programı : DENİZ TEKNOLOJİSİ MÜHENDİSLİĞİ

OCAK 2003