

DALGA ENERJİSİ TESİSLERİNE GENEL BAKIŞ

Dz. Y. Müh. Yzb. Gürkan ÖRER
Dz. K. K. İzmir Bak. Onr. ve İ. K.lığı
İZMİR
gurkanorer@eng.ege.edu.tr

Yrd. Doç. Dr. K. Turgut GÜRSEL
Ege Üniversitesi - Mühendislik Fakültesi
Makina Mühendisliği Bölümü
35100 Bornova İZMİR
tgursel@eng.ege.edu.tr

Doç. Dr. Aydoğan ÖZDAMAR
Ege Üniversitesi - Mühendislik Fakültesi
Makina Mühendisliği Bölümü
35100 Bornova İZMİR
aozdamar@bornova.ege.edu.tr

Prof. Dr. Necdet ÖZBALTA
Ege Üniversitesi - Mühendislik Fakültesi
Makina Mühendisliği Bölümü
35100 Bornova İZMİR
nozbalta@bornova.ege.edu.tr

ÖZET

Fosil yakıtların tükenme eğilimine girdiği günümüzde, dünyadaki enerji gereksiniminin karşılanmasında yeni arayışlar artarak devam etmektedir. Bu yeni arayışlara en iyi cevap; rüzgar, dalga, güneş ışınları, hidrolik, biyomas ve jeotermal gibi yenilenebilir enerjilerden gelmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından dalga enerjisi, günümüz şartlarında ekonomik değildir. Fakat, fosil kökenli yakıtların giderek tükenmesi, bu arada neden oldukları ağır çevre sorunları ve dalga enerjisi teknolojisindeki gelişmeler, dalga enerjisini de ekonomik hale getirecektir. Dalga enerjisinden; cisim hareketini veya cisimdeki şekil değiştirmeyi kullanan sistemler, su basıncını kullanan sistemler ve hava basıncını kullanan sistemler olmak üzere temelde üç yöntemle elektrik enerjisi elde edilmektedir. Bu çalışmada; dalga oluşumu, enerjisi ve dalga enerjisi tesisleri ile ilgili genel bilgiler aktarılacak, dünyanın bu teknolojiye bulunduğu durum ve Türkiye'nin bu enerji kaynağını değerlendirebilmesi irdelenecektir.

1. GİRİŞ

Deniz kökenli tüm yenilenebilir enerjileri; deniz dalga enerjisi, gel-git (med-cezir) enerjisi, deniz sıcaklık gradyent enerjisi, deniz tuzluluk gradyent enerjisi, deniz akıntıları enerjisi ve deniz yüzeyi buharlaşma enerjisi olarak sıralamak mümkündür. Çevre faktörleriyle birlikte türbinlerin verimi de gözönüne alındığında, deniz sıcaklık gradyent enerjisi, deniz tuzluluk gradyent enerjisi, deniz akıntıları enerjisi ve deniz yüzeyi buharlaşma enerjisini günümüz teknolojisiyle ekonomik olarak elektrik enerjisine dönüştürme olanağı yoktur.

Deniz dalgaları; rüzgar, denizlerdeki hareketli taşıtlar, denizlerin altındaki depremler veya ay ve güneşin çekim kuvveti gibi dış etkiler sonucunda dengesi bozulan deniz yüzeyinin tekrar eski denge konumuna dönmek için yaptığı hareketlerdir. Rüzgar etkisiyle oluşan deniz dalgaları, rüzgar dışındaki etmenlerle oluşan deniz dalgalarına göre süreklidirler ve bu nedenle de enerji eldesinde öncelikle dikkate alınırlar.

Dalga enerjisi potansiyelinin; doğada mevcut hali doğal potansiyel, doğal potansiyelin teknoloji aracılığı ile kullanılabilir enerjiye dönüştürülmüş şekli teknik potansiyel ve diğer enerji kaynaklarıyla karşılaştırılması sonucu ekonomik olarak nitelenen miktarı da ekonomik potansiyel olarak adlandırılır. Tablo 1’de, yıllık dünya yenilenebilir enerji doğal potansiyeli verilmektedir. Tablo 1’in incelenmesinden, dünya deniz kaynaklı doğal enerji potansiyelinin; hidrolik ve biyomas enerjisinin doğal potansiyelinden fazla, rüzgar enerjisi doğal potansiyelinin ise % 25’i kadar olduğu anlaşılmaktadır (1, 2).

Tablo 1. Yıllık dünya yenilenebilir enerji doğal potansiyeli (1,2)

<i>Güneş Kaynaklı Enerji Türü</i>	<i>Güneş Enerjisi</i>	<i>Rüzgar Enerjisi</i>	<i>Deniz Kaynaklı Enerjiler</i>	<i>Hidrolik Enerji</i>	<i>Biyomas Enerjisi</i>
Dünya Potansiyeli [Milyar kWh]	1 524 240 000	30 844 000	7 621 000	46 000	1 524 000

Gel-git enerjisinden, bu fiziksel olayın çok belirgin olduğu okyanus kıyılarında yararlanılabileceği için, bu enerjinin Türkiye açısından önemi yoktur. Ancak, Marmara Denizi dışında kıyı uzunluğu yaklaşık 8 200 km’yi bulan Türkiye için, dalga enerjisinin önemli bir potansiyel oluşturduğu yadsınamaz bir gerçektir. Dalga cephesinin gücü, okyanuslar dışında 10 – 40 kW/m arasında değişmekle birlikte, Akdeniz kıyıları için bu değer yaklaşık 13 kW/m olarak verilmektedir. Türkiye dışında Akdeniz’de yapılmış ölçümler, bu gücün yıl boyu 8,4 – 15,5 kW/m arasında değiştiğini göstermektedir (1). Türkiye’de dalga rasatları ve bunlara ilişkin ölçüm verileri yetersizdir. Fakat, rüzgar ölçüm değerleri, deniz düzeyine uyarlanarak, rüzgarların oluşturacakları dalga yüksekliklerini belirlemek ve buradan da elde edilecek dalga enerjisini hesaplamak mümkündür.

Araştırmacılar tarafından, birim genişliğe etkiyen ortalama dalga gücü; Kuzeydoğu Atlantik’te 100 kW/m (3), Portekiz Sahilleri’nde 5-26 kW/m (4), Kanada’da 0,6-101,6 kW/m (5), Güney Afrika’da 10-14 kW/m (6) ve Çin’de 0,7-4,5 kW/m (7) olarak verilmektedir. İnceleme yapılan zaman diliminde, birim genişliğe etkiyen ortalama dalga gücü 14,84 kW/m olarak saptanan Çeşme’nin, dalga enerjisinin değerlendirilmesi açısından diğer ülkeler ile de yarışabilecek potansiyele sahip olduğu anlaşılmaktadır (2).

Dalga enerjisi potansiyeli ile ilgili rakamlarda dikkat edilmesi gereken nokta, bu tahminlerin belli kabullere dayandığı ve bu kabullerin her zaman tartışmaya açık olduğudur. Dalga enerjisi potansiyelinin daha gerçekçi olarak belirlenebilmesi için, dalga enerjisinden yararlanılacak olan bölgede uzun yıllara dayanan ve oldukça pahalı olan ölçümler yapmak gerekmektedir. Bu ölçümlerin yapılamadığı durumlarda ise, daha ekonomik olan rüzgar ölçümleri yapılmakta, rüzgar-dalga arasındaki bağıntıyı veren ve bir çok ölçüm sonucundan elde edilmiş yarı ampirik formüllerle dalga enerjisi hesaplanmaktadır. Hesaplanan bu enerjiden de, ölçüm alınan noktaya yerleştirilen bir veya

daha fazla dalga türbini yardımıyla elde edilebilecek olan elektrik enerjisi miktarı saptanabilmektedir (2).

Bütün kıyılarımızdan aynı oranlarda dalga enerjisi eldesi mümkün olmamakla birlikte, deniz dalga konvertörlerinin tek sıra halinde dizilmesi gerekmediğinden, açık cephe kıyı uzunluğunun büyük önemi yoktur. Ayrıca dalga konvertörlerinin, deniz rüzgar türbinleri ile entegre bağlantılı olarak şebekeyi beslediği sistem üzerinde de durulmaktadır.

Türkiye kıyılarının 1/5'den yararlanarak sağlanabilecek dalga enerjisi teknik potansiyeli, 18,5 milyar kWh olarak tahmin edilmektedir (1). Dalga enerjisinin kullanımı, Türkiye'nin gündemine henüz girmemiştir. Fakat, başta Norveç olmak üzere, dünyada çeşitli kıyılarda öncü santraller kurulmuştur.

Gel-git enerjisi

Dalga enerjisinden de benzer prensiple yararlanılabildiğinden, burada kısaca gel-git enerjisine ve bu enerjiden nasıl yararlanıldığına değinilecektir. Bu enerjinin dünyadaki potansiyeli, genel bir tahminle 15 – 22 uygun yer için yaklaşık 100.000 MW düzeyindedir (8). Şu ana kadar, iki büyük gel-git enerji santrali kurulmuştur: Bunlardan biri Fransa'da St. Malo yakınlarında 240 MW nominal güçle, diğeri Kanada'da Annapolis'de 18 MW nominal güçle inşa edilmiştir. Ayrıca, Çin'de 1961 – 1989 yılları arasında yapılmış 9 santral bulunmaktadır. Bunlardan ikisi 5,0 ve 3,2 MW olmak üzere, toplam dokuz santral 10,97 MW nominal güce sahiptir. Bunların dışında, Rusya Kislaya'da da 2 MW gücünde bir santral bulunmaktadır (9).

Gel-git nedeniyle uygun deniz kıyılarında oluşan seviye farklarından enerji elde edilebilmesi için, açık denizden ayrılmış bir göl/gölet gereklidir. Seviye farkına göre deniz suyu, denizden gölete veya göletten denize doğru türbinler üzerinden geçerken, türbinler aracılığıyla enerji elde edilir.

2. DALGA ENERJİSİ

Dalga enerjisinin anlaşılabilmesi, bazı temel bilgilerin açıklanmasını gerekli kılmaktadır. Bu nedenle, burada, dalga teorilerinden söz edilecek ve ardından da lineer dalga teorisi kısaca açıklanacaktır. Daha sonra da, dalga enerjisi ve gücü irdelenecektir.

2.1. Temel dalga teorileri

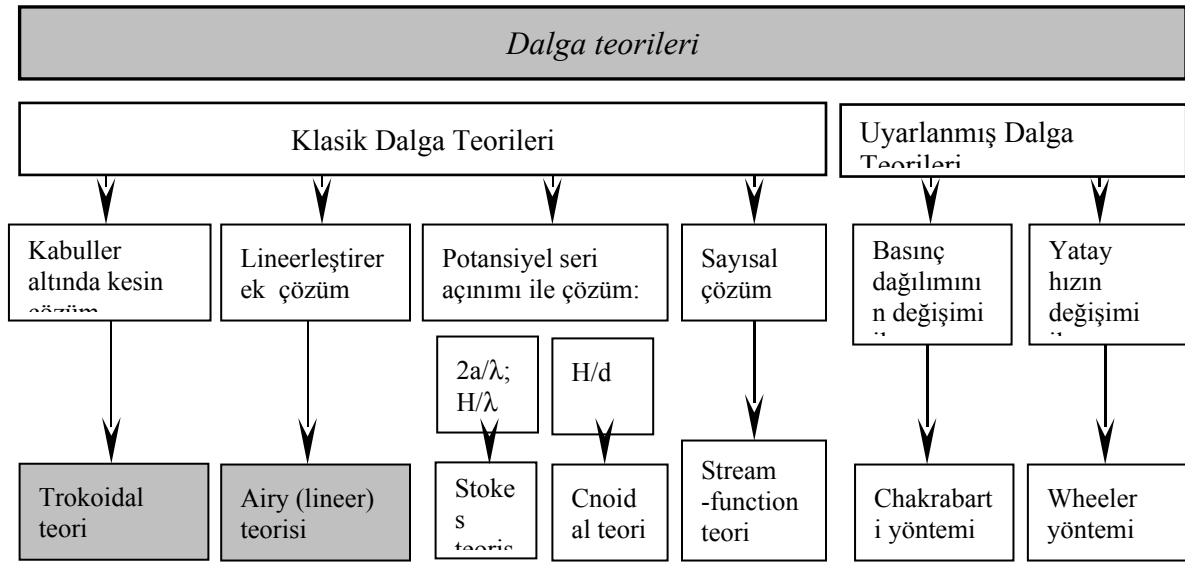
Dalgalar, çok karmaşık yapıya sahiptirler ve bazı teorilerle basitleştirilerek irdelenirler. Tüm teorilerde, aşağıdaki kabullerden hareket edilir:

- Akışkan sıkıştırılmaz ve sürtünmesizdir.
- Yüzeyde basınç sabittir.
- Dip yatay durumdadır ve geçişli değildir.
- Problem, iki boyutlu olarak irdelenir ve çözülür.
- Dalga hareketi, potansiyel akış olarak değerlendirilir.

Sonuç olarak, bu sınır koşulları lineer olmayıp tamamen sağlanmaları gerektiğinden, problemin kapalı bir analitik çözümü bulunamaz. Şekil 1’de verilen teorilerle, dalga formu ve hız potansiyeli için yaklaşık çözümler geliştirilmiştir (9). Bu teorilerle ilgili kısa bilgiler, aşağıda verilmiştir:

i) *Lineer Teori*: Karakteristik parametreler sayılan dalga yüksekliğinin dalga boyuna oranı, dalga yüksekliğinin derinliğe ve dalga boyunun derinliğe oranlarının (H/λ , H/d , λ/d) sınırlanmasıyla diferansiyel denklem lineerleştirilerek basitleştirilir. Burada yapılan sınırlandırma, derinliğe ve dalga boyuna göre dalga yüksekliğini çok küçük kabul etme şeklindedir ($H \ll \lambda$ ve $H \ll d$).

Sonuç olarak, dalga yüksekliğinin dalga boyuna oranında, $H/\lambda < 1/50$ değerlerinin söz konusu olması durumu *derin su*’ya karşı gelir ve dalganın kinematik özellikleri Lineer teori yardımıyla çok büyük yaklaşıklıkla hesaplanabilir. Bu nedenle, Lineer teori çok geniş bir uygulama alanı bulmaktadır.



Şekil 1. Dalga teorilerinin yapılanması

ii) Yalnızca derin suda geçerli olan Trokoidal teoride, belirli kabuller altında (moleküller rotasyon yapmakta olup, hareket hız potansiyeli taşımamakta) problemin kesin çözümü vardır. Başta gemiler olmak üzere, yüzer cisimlerin dalgalı deniz için yapılan mukavemet hesaplarında Trokoidal teoriden yararlanılır.

iii) Seriyeye açarak ve derin su özelliklerini dikkate alarak diferansiyel denklemin çözümü H/λ veya $2a/\lambda$ üsleriyle gerçekleştirildiğinde, Stokes teorisi ile çözüm yapılmış olur. *Sığ sularda* H/d üsleriyle yapılan çözümler, Cnoidal teori olarak adlandırılan çözümleri verir.

iv) Diferansiyel denklemin sayısal olarak yaklaşık çözümünü bulmak mümkündür. Akım fonksiyonunu, verilen sınır değer problemine yaklaştırmak çözümlerden biridir ve buna Streamfunction teorisi adı verilir.

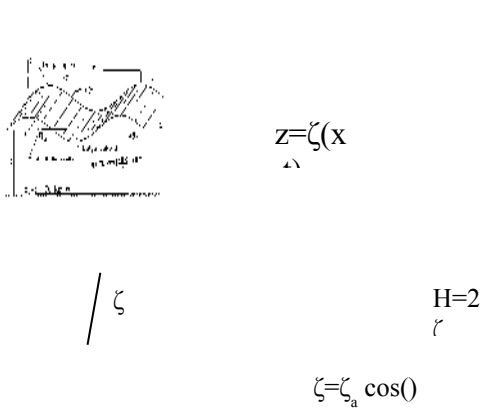
v) Chakrabarti, Lineer teoriye göre saptanmış basınç dağılımının pürüzsüz su yüzeyinde belirli bir sıçrama yaptığını saptamıştır. Dolayısıyla, basınç dağılımının belirlenmesi için, lineer denklemin, Laplace denklemi artık her yerde tam olarak sağlanamasa da dinamik sınır koşulları tam olarak sağlanıncaya kadar, değiştirilmesini ($k \cdot \zeta$ eklenmesini) önermiştir:

$$P = \rho \cdot g \{ \zeta \cdot \cosh[k \cdot (z+d)] \cdot z / \cosh(k \cdot (d+\zeta)) \}$$

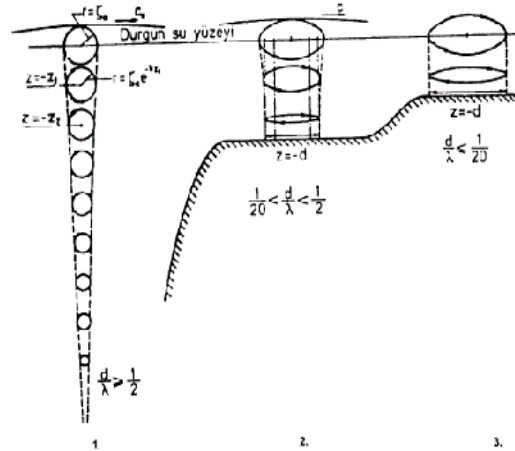
vi) Wheeler, Lineer teoriye göre saptanmış, teorik tanecik hızlarını deneylerde ölçülen hızlara uydurmak için $\cosh[k \cdot (z+d)] / \cosh(k \cdot d)$ teriminde değişiklikler yapmıştır.

2.2. Lineer dalga teorisi

Lineer dalga teorisi, dalga profilini bir sinüs veya kosinüs eğrisiyle ifade ettiğinden, bu tür dalgalara aynı zamanda sinüzoidal dalgalar denir. Derinliği d olan dalgalı bir denizde, dalga hareketi konumun ve zamanın bağılı olarak $z = \zeta(x, y, t)$ şeklinde ifade edilir (Şekil 2).



Şekil 2. Lineer dalga teorisinde dalga



Şekil 3 Su zerrelerinin yörüngeleri üzerindeki derinlik etkisi (10)

Dinamik su yüzeyi sınır koşuluna göre; su yüzeyindeki bir su taneciği, ζ ile belirtilen bir düşey yer değiştirme sırasında su derinliğine göre dairesel veya eliptik yörüngeleri izler. Kinematik su yüzeyi sınır koşulu; serbest su yüzeyinde sıvının bu yüzeyi terk edemediği ve serbest su yüzeyinde her nokta için sıvı normal hızının yüzey normal hızına eşit olduğudur. Yatay taban sınır koşulu ise, deniz dibinde taban boyunca sıvıya ait düşey hızların sıfır olması gerektiğidir.

Bunun sonucunda, deniz derinliğinin azalmasıyla dalga karakteristikleri ve su taneciklerinin dalga hareketindeki yörüngeleri değişime uğrar. Eğer, $d/\lambda < 1/20$ ise buna *çok sığ su*, $d/\lambda > 1/2$ ise *derin su* söz konusudur. Bu sınırlar arasında kalan sular, *sığ su* olarak adlandırılır (Şekil 3).

2.3. Dalga Enerjisi ve Gücü

Dalga gücü, gerektiğinde aşağıdaki basit ampirik formülle yaklaşık olarak hesaplanabilir:

$$E = 0,55.H^2.T.L \quad [kW]$$

Burada H [m] dalga yüksekliği, L [m] dalga boyu ve T [s] dalga periyodudur. Bazı kaynaklarda, dünya ortalama dalga gücü 36 kW/m olarak verilmektedir. Bu değer istisnaî olarak 700 kW/m^2 'ye kadar çıkabilir (8). Böylelikle, dalga türbinlerinin ve sabitleme bağlantılarının mukavemet yönünden ne kadar sağlam olmaları gerektiği de ortaya çıkmaktadır.

Dalga enerjisi tesisleri tarafından bir başka enerjiye dönüştürülecek olan dalga enerjisi, denizin birim alanına düşen enerji \bar{E} olarak tanımlanır ve kesin değeri, dalga bileşenlerinin frekanslara göre dağılımını belirten $S_{\zeta\zeta}(\omega)$ dalga enerjisi spektrum fonksiyonunun tüm frekanslardaki toplamı ile deniz suyunun özgül ağırlığının çarpımı sonucu bulunur (2):

$$\bar{E} = \gamma_{ds} \cdot \int_0^{\infty} S_{\zeta\zeta}(\omega) \cdot d\omega \quad [Nm/m^2 \text{ veya } Ws/m^2] \quad (1)$$

Bu bağıntıda; deniz suyu özgül ağırlığı $\gamma_{ds} = 10250 \text{ N/m}^3$ olarak alınmakta ve dalga enerjisi spektrumu $S_{\zeta\zeta}(\omega)$, çok sayıdaki ölçümlerden elde edilen yarı ampirik bağıntılar halinde rüzgar hızının bağılısı olarak verilmektedir (10). Dalga enerjisi spektrumu bağıntılarından en çok kullanılanı, Kuzey Atlantik Okyanusu'nda tam oluşmuş deniz durumları için verilen Pierson-Moskowitz dalga enerjisi spektrumudur:

$$S_{\zeta\zeta}(\omega) = \frac{8,1 \cdot g^2}{\omega^5} \cdot 10^{-3} \cdot e^{-0,74 \left(\frac{g}{\omega \cdot V_r} \right)^4} \quad [m^2s] \quad (2)$$

Burada; sabit yerçekimi ivmesi $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, rüzgar hızı $V_r \text{ m/s}$ ve dalga dairesel frekansı $\omega \text{ rd/s}$ ile simgelenirken, $S_{\zeta\zeta}(\omega)$ dalga enerjisi spektrumunun birimi m^2s olmaktadır. (1) ve (2) nolu denklemlerden de anlaşılacağı gibi, deniz yüzeyindeki yatay birim alana düşen dalga enerjisinin hesabı için; ölçülen her bir rüzgar hızında dalga dairesel frekansı sıfırdan sonsuza kadar olan aralık için bir dalga enerjisi spektrumu oluşturulmalı ve bu da integre edilmelidir. Pratikte birim alana etkiyen dalga enerjisine, 0,2 - 3 rd/s arasındaki dalga dairesel frekansları katkıda bulunmaktadır. Bu aralığın dışındaki doğal dairesel frekanslarda hesaplanan enerji, ihmal edilebilecek kadar küçük kalmaktadır. Genellikle (1) nolu denklemdeki integral işlemi, nümerik olarak yapılır ve çoğu kez de Simpson yöntemi kullanılır (2).

Dalga türbinleri ile elektrik enerjisi eldesinde asıl önemli olan, enerji akımı yani dalga gücüdür. Dalga genişliği b olmak üzere, dalgaların birim zamanda yaptığı iş veya dalga gücü

$$P = \bar{E} \cdot b \cdot C_g \quad [W] \quad (3)$$

bağıntısı ile verilir (10). (3) numaralı denklemde bulunan C_g , aynı dalga boyundaki dalgalardan oluşan dalga grubunun hızıdır; sırasıyla derin su ve sığ su için

$$C_g = C/2 \quad \text{ve} \quad C_g = \sqrt{g \cdot d} \quad [m/s] \quad (4)$$

eşitliği ile tanımlanır. Burada C dalga hızı ve d su derinliğidir. Bir dalganın karşısına çıkan b genişliğindeki bir cisme vereceği enerjinin hesabı için, (3) denklemi ile dalga gücünün etkiye süresi olan Δt 'nin çarpılması gerekir.

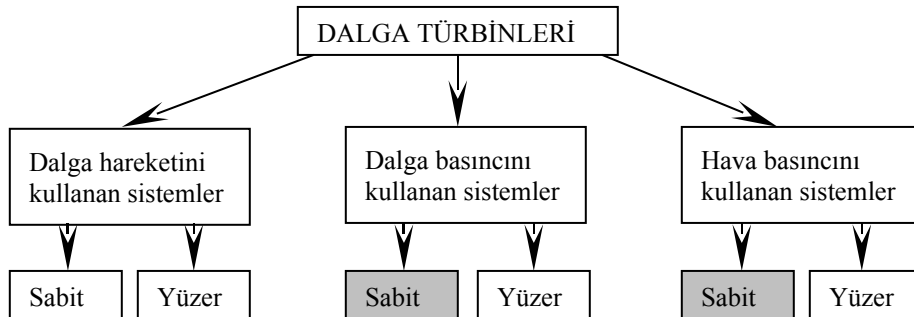
3. DALGA TÜRBİNLERİ

3.1. Dalga türbinlerinin sistematik analizi

Bu çalışmada, günümüze kadar projelendirilmiş veya inşa edilmiş dalga türbinleri aşağıdaki gibi üç ana kategoriye ayrılmıştır (Şekil 4):

- i) Dalganın hareketi sonucu hareketlenen cismin tümünün veya bir bölümünün hareketini kullanan sistemler
- ii) Dalganın basıncını kullanan sistemler
- iii) Dalga basıncının havayı sıkıştırmasından yararlanarak, hava basıncını kullanan sistemler

Her kategoride yer alan sistem zemine bağlı (sabit) veya yüzen sistem olmak üzere iki alt kategori ayrılır (Şekil 4).



Şekil 4. Dalga türbinlerin gruplandırılması

Şekil 5-11’da yer alan ilk üç grup sistem için sırasıyla belirtilebilecek en önemli özellikler şunlardır:

Tip *Xa-1* ve *b-1* ile gösterilen sistemler genel olarak dalganın kaldırma kuvvetinden (sephiye) yararlanırlar.

Tip *Xa-2* ve *b-2* ile gösterilen sistemler, uygun konstrüksiyonları yardımıyla dalganın kaldırma kuvveti etkisini büyütürler.

Tip *Xa-3* ve *b-3* ile verilen sistemler, ağırlıklı olarak dalganın basınç kuvvetinden yararlanırlar.

3.2. Dalga hareketini kullanan sabit sistemler (Tip 1a)

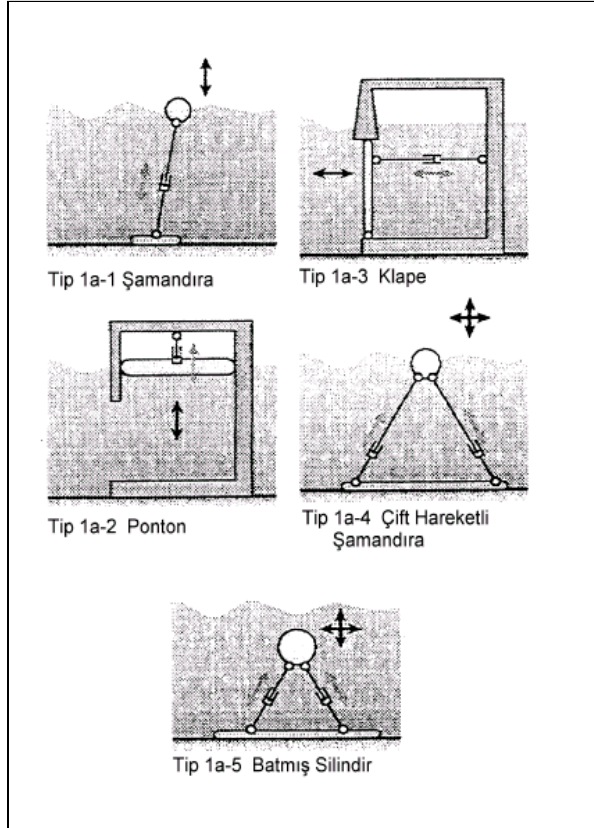
Bu sistemler, cisim/cisimler ile deniz zemini arasında dalgalar tarafından oluşturulan bağıl hareketten yararlanırlar (Şekil 5). Cisim ile zemin arasındaki bağlantı bir çeşit redüktör veya pompa olarak tasarlanabilir. Pompa aracılığıyla oluşturulan basınç farkından, 1 – 50 *kW* nominal güce sahip türbinlerin çalıştırılmasında yararlanan prototip santraller; Norveç, Japonya, Danimarka, İsveç ve ABD’de üretilmiştir.

Prototip olarak üretilip denenilen bu sistemlerin bir bölümü, dalgaların oluşturduğu yüklere ve çevre koşullarına dayanamamış, diğer bir bölümü bakım/onarım güçlükleri ve düşük verimleri nedeniyle uygulamaya sokulamamıştır.

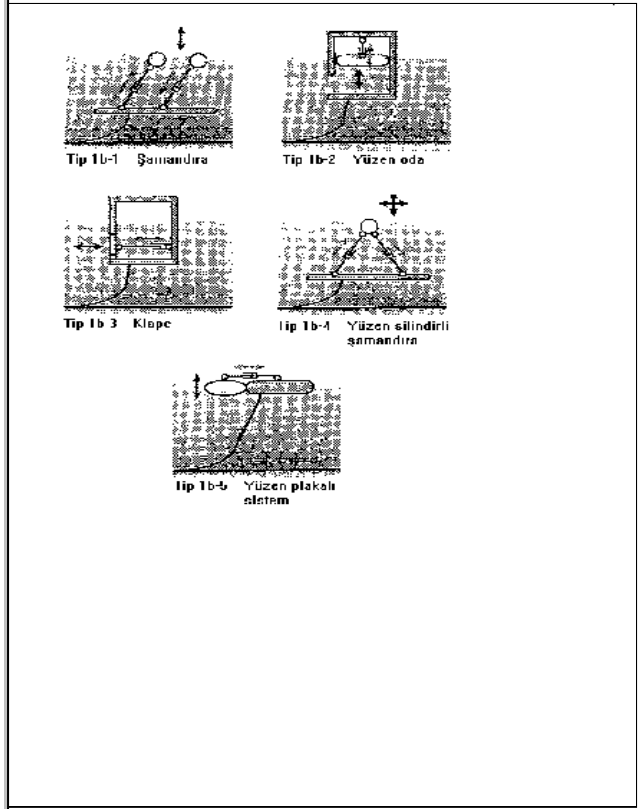
3.3. Dalga hareketini kullanan yüzer sistemler (Tip 1b)

Bu sistemde, yukarıdaki sistemden biraz farklı olarak, yüzer bir cisim ile yüzen bir referans noktası arasındaki bağıl hareketlerden yararlanılır (Şekil 6). Burada ana problem, tasarlanan yüzer referans noktasının sabit bir nokta gibi davranmayıp, dalga hareketine uymasındır. Dolayısıyla, bu tip hareketleri, elektrik üretiminde verimli olarak kullanmak zordur. Ayrıca, bir kasırğa sırasında bu tip konstrüksiyonlar ağır zarar görür, hatta bataabilirler.

Bu tip sistemler, özellikle gelişmekte olan ülkelerde tatlı su pompası olarak kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Prototipleri 3 - 30 *kW* gücündeki türbinleri çalıştırarak elektrik üretmek amacıyla kullanılmaktadır. Ayrıca, bir deniz feneri bu sistemle aydınlatılmaktadır.



Şekil 5. Cisim hareketi veya cisimdeki şekil değiştirmeyi kullanan yere bağlı sistemler (9)



Şekil 6. Cisim hareketi veya cisimdeki şekil değiştirmeyi kullanan yüzer sistemler (9)

3.4. Dalga basıncını kullanan sabit sistemler (Tip 2a)

Bu sistemlerde, cisme gelen dalgaların düzgün bir deniz akıntısına dönüştürülmesi amaçlanır (Şekil 7). Böyle bir santral, ilk kez 1986’da Norveç’te kurulmuştur ve halen kullanımdadır.

“Norwave Tapchan” sistimli dalga türbini

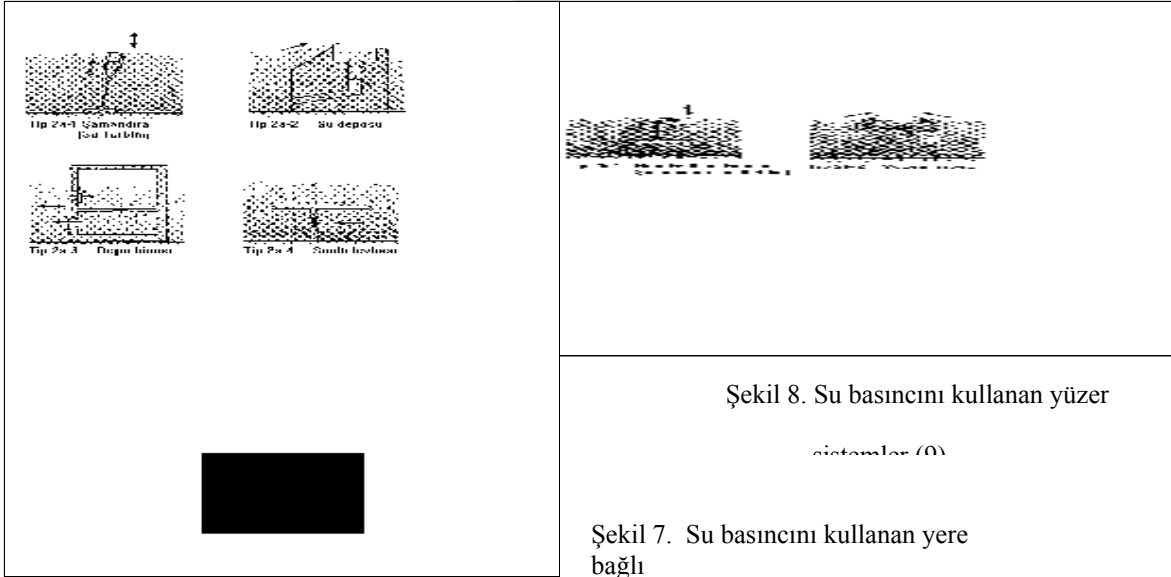
Sistemin ismi, “tapered channel” terimlerinin birleşmesiyle oluşturulmuştur, yani giderek kesiti daralan kanal anlamına gelmektedir. Norveç’te Bergen yakınlarındaki Toftestallen’da 1986’da kurulan bu sistemde, ilerleyen dalgalar; kıyıdaki kayalıklara yerleştirilmiş ve huni formundaki kolektörde toplanarak, kolektör sonuna doğru hızlandırılırlar. Çünkü, kolektör kesitinin formu, farklı dalga frekans ve yönlerinin toplanma verimini optime edecek şekilde dizayn edilmiştir. İnşa edilen sistem 350 kW nominal güce sahip olup, 400 kW maksimum güce ulaşabilmektedir. Tesisin denize doğru 60 m genişlikte bir giriş bölümü bulunmaktadır. Boyu 90 m olan sistemin sonuna, yine boyu 90 m olan bir konverter eklenmiş olup, bunun giriş genişliği 3 m tutmaktadır. Konverterin üst kenarı deniz seviyesinden 3 m yukarıdadır ve genişliği 20 cm’ye kadar daralır. İlerleyen dalga, konverter

içindeki yolu boyunca su kütlelerinin bir bölümünü kaybederek yükselir ve 5500 m^2 yüzeyi bulunan gölete dökülür. Böylelikle, dalgaların kinetik enerjisi, kama şeklinde oyukların da yardımıyla, potansiyel enerjiye dönüştürülür. Burada biriktirilen deniz suyu, bir konvansiyonel alçak basınç su türbininden geçirilerek denize boşaltılır. Bu sistemin sahip olduğu büyük avantaj, dalgaların yalnızca pasif bir çelik-beton konstrüksiyona etki etmesidir. Konvansiyonel su türbini korunaklı bir yerde bulunduğundan, bu sistem 1988 yılındaki kasırgada zarar görmemiştir. Bunun dışında, düzensiz dalga enerjisi düzgün (stasyoner) potansiyel enerji şeklinde depolandığından, elektrik enerjisi üretimi öncesi diğer sistemlerde görülen instasyonel enerji akışı problemi çözümlenmiştir. Ayrıca, santralin bakım ve onarımı kolaylıkla gerçekleştirilebilmektedir. Böyle bir sistemin verimi basit olarak aşağıdaki formülle verilebilir:

$$\eta = \frac{\lambda}{\lambda + \pi \cdot H/2}$$

λ : Dalga boyu [m]
H: Dalga yüksekliği [m]

Anlaşıldığı gibi, artan dalga boyu ile verim artmakta, ancak artan dalga yüksekliği ile azalmaktadır. Dalga yüksekliği iki katına çıktığında, $H/\lambda=1/20$ için verimde yaklaşık % 7'lik bir azalma olmaktadır. Bu sistemdeki birim elektrik enerjisi maliyeti yaklaşık olarak $0,07 \text{ €/kWh}$ ve yıllık enerji üretimi 2 GWh olarak verilmektedir (8). $1,5 \text{ MW}$ nominal güce sahip yeni bir dalga türbini, Tasmanya için planlanmaktadır.



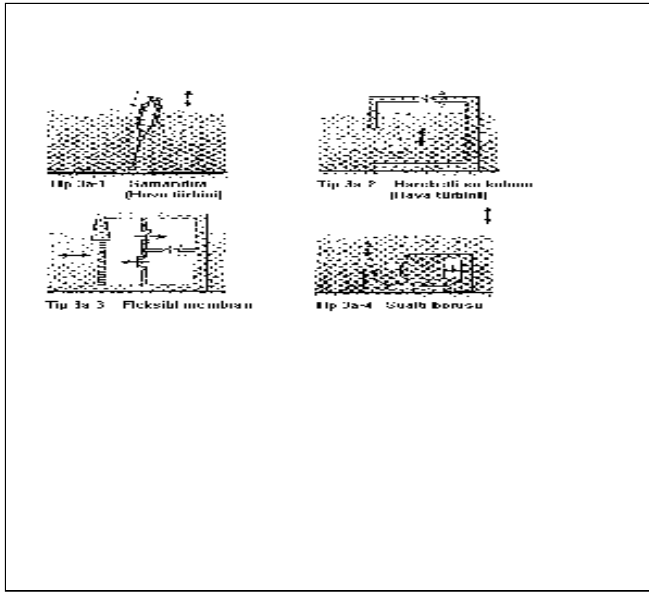
Şekil 7. Su basıncını kullanan yere bağlı sistemler (9)

3.5. Dalga basıncını kullanan yüzer sistemler (Tip 2b)

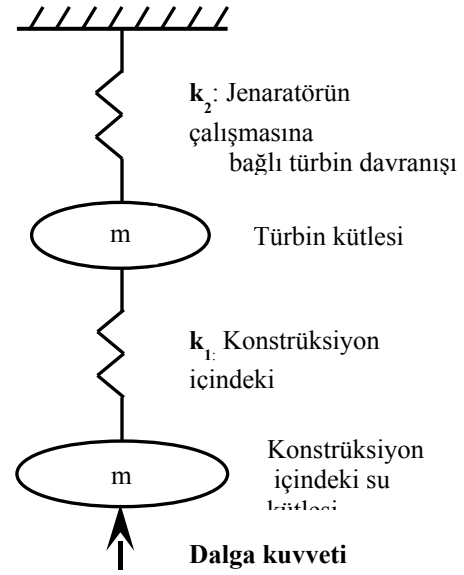
Bu tip sistemler ile ilgili çok sayıda proje yapılmış olmakla birlikte, bunlardan hiç biri prototip olarak üretilmemiştir (Şekil 8). Dolayısıyla, konu ile ilgili tasarımlara burada değinilmemiştir.

3.6. Hava basıncını kullanan sabit sistemler (Tip 3a)

Bu sistemler, yalnızca su kütlesinin salınımına dayanarak enerji üretmesi öngörülen tasarımlardan ayrılırlar (Şekil 9). Çünkü, su salınımının havayı sıkıştırması ve bu havanın bir türbinde genişlemesiyle enerji üretimi gerçekleşir. Salınlımlı su kütlesi sistemine göre çalışan bir sistemin mekanik modeli, Şekil 10'deki gibi oluşturulabilir. Dalga türbininin verimi, iki kütleli bu titreşim sisteminin rezonans frekansı ile sisteme gelen dalgaların frekansı çakıştığında optimal olur.



Şekil 9. Hava basıncını kullanan yere bağlı



Şekil 10. Salınlımlı su kütlesi sistemine göre çalışan bir sistemin mekanik

Salınlımlı (hareketli) su kolonuyla çalışan türbinler (OWC)

Salınlımlı su kolonuna (Multiresonant Oscillating Water Column System) göre gerçekleştirilmiş sistemde, dalga tarafından getirilen deniz suyu, kapalı bir konstrüksiyonun alt tarafından girerek yükselir. Bu sırada konstrüksiyon içinde bulunan hava, sıkışmaya başlar. Sıkıştırılan bu hava da, kesiti giderek daralan bir boru yardımıyla bir türbine yönlendirilir. Yerçekimi etkisiyle geri dönen dalga, bu kez konstrüksiyon içinde negatif basınç (vakum) oluşturur ve dışarıdan içeriye çekilen hava, türbini çalıştırmaya devam eder. “Multiresonant” sözcüğünden dalga periyotları ile konstrüksiyon içindeki su kütlesinin salınımları arasındaki rezonans ifade edilmektedir. Bu tip sabit sistemlerin yüzer sistemlere göre avantajı, dalga enerjisinin tüm yapı üzerine yoğunlaşmasının ve rezonans frekansının, deniz ve dalga karakteristiklerine uygun hale gelmesinin sağlanabilmesidir (9).

Böyle bir sistem, Norveç'in Kuzey Denizi kıyısında Bergen kentinde inşa edilmiştir. Tüm yapı, bir dik kaya yamacına yerleştirilerek, absorbe edilecek dalga enerjisinin maksimuma

çıkartılması hedeflenmiş ve 500 kW nominal güce sahip bir türbin çalıştırılmıştır. Ancak, bu prototip tesis, 1988 yılındaki kasırgada yıkılmıştır (9).

Masuda tarafından tasarlanan şamandıra tipli bir santralden yaklaşık 1200 tane üretilmiş ve bunlardan 20 yıl kullanılanlar olmuştur. Böyle bir santral, 1983'de Japonya'nın Sanze bölgesinde yapılmış olup, 40 kW güce sahiptir. Ayrıca başka bir santral, 30 kW güçtedir ve 1987 yılından beri Japonya'nın Kujukuri bölgesinde çalıştırılmaktadır. Bunların dışında, Niigata'da, hem dalgakıran olarak kullanılan hem de 40 kW güç üretecek şekilde Japonlar tarafından yapılan santral iki yıl kullanılmıştır. Sakata'da inşa edilmiş santral, hem dalga kıran olarak hizmet verirken, hem de 60 kW nominal güce sahip bir türbini çalıştırmaktadır. Ayrıca Hindistan'nın Vizhinjam bölgesinde inşa edilmiş 150 kW nominal gücündeki tesis, şu anda çalışan en büyük santral olup, sistem ile ilgili iyileştirme çalışmaları yoğun olarak sürdürülmektedir. Çalışmalar tamamlandıktan sonra santralin seri üretimine geçilmesi planlanmaktadır. Çin'in Dawanshan bölgesinde yapılmış tesiste, türbin osilasyon bölümünün çok üstünde bir yere yerleştirilmiş ve hava, uzun bir boru sistemiyle türbine yönlendirilmiştir. Amaç, santralin çok farklı dalga yüksekliklerinde, dolayısıyla su seviyelerinde, çalışabilmesi ve kasırgalara dayanabilmesidir. Kuzey İrlanda'da İslay kıyılarında araştırma amaçlı 75 kW nominal güce sahip bir dalga enerjisi tesisi kurulmuştur. Aynı amaçla 500 kW güçle çalışacak bir santral, Portekiz'e ait Azor Adaları'nın Pico bölgesinde AB tarafından inşa ettirilmektedir (9).

3.7. Hava basıncını kullanan yüzer sistemler (Tip 3b)

Basıncılı hava oluşturan ve 3.6. konusunda açıklanan sistemler, ilke olarak yüzer sistemler olarak da tasarlanıp inşa edilebilmektedir (Şekil 11). Gemi formuna benzer forma sahip 80 m uzunluğunda 13 m genişliğindeki yüzer bir cisimde, değişik salınımlı su kolonu (OWC) sistemleri birer yıllık üç ayrı deney süresince denenmiştir. Çin'de üretilen ve kendi enerjisini üreten yüzer deniz fenerlerinde, kombine hareketlerden yararlanan OWC sistemi kullanılır.

4. DALGA ENERJİSİ TESİSLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

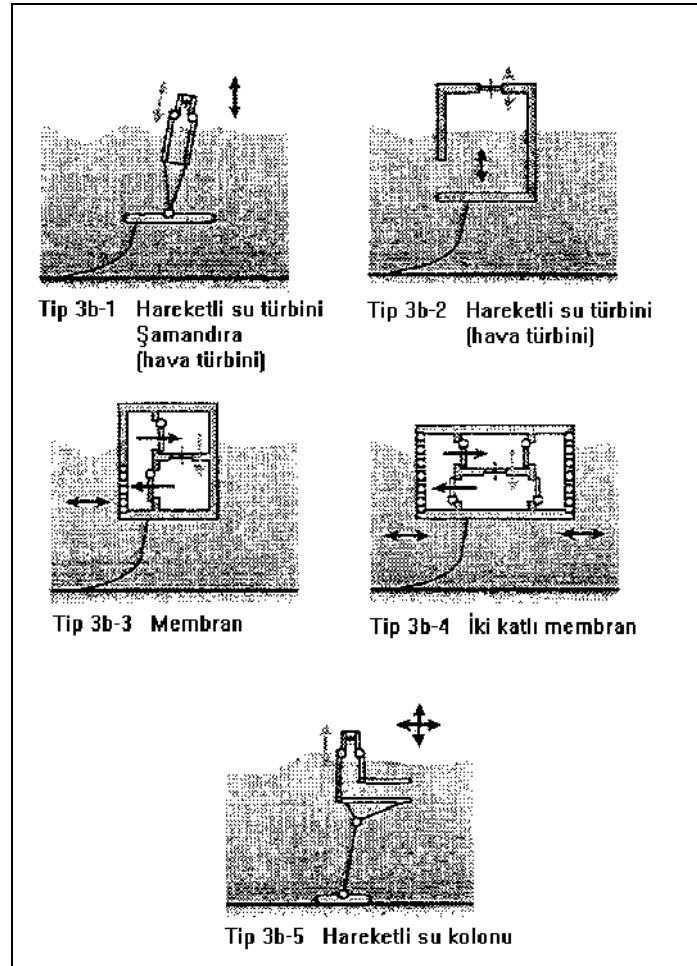
Bugüne kadar geliştirilmiş olan dalga enerjisi dönüştürücü sistemlerinin belirgin özellikleri şöyle sıralanabilir:

- “Tapchan” olarak adlandırılan, Tip 2a'da yer alan ve konvansiyonel tekniği kullanarak yüksek verimlilikle çalışan bir dalga enerjisi santrali bulunmaktadır. Bu sistemin tek dezavantajı, kıyıda çok geniş bir alana ihtiyaç duyulmasıdır. Konu ile ilgili ek araştırmalar gerektirecek bilgi ve teknoloji açığı bulunmamaktadır.
- Bugüne kadar en kapsamlı araştırmalar, kıyıya yakın yerlerdeki OWC sistemleriyle ilgili olarak yürütülmüştür. Ancak, söz konusu çalışmaların önemli oranda gizli olarak gerçekleştirilmiş olması, bu alandaki gelişmeleri yavaşlatmıştır. Bu nedenle, konuyla ilgili olarak önemli oranda bilgi açığı bulunmakta olup, bu sistemlerin geliştirilme şansı yüksektir.

- Bugüne kadar geliştirilen projeler, ya açık deniz (off-shore) sistemleridir veya kıyıda (on-shore) inşa edilmiş yapılardır. Ancak araştırmalar, kıyıya yakın yerlere konuşlanan sistemlerden daha yüksek verimle ve daha düşük maliyetle enerji üretilebileceğini göstermektedir.

Bunların dışında, son 30 yılda elektrik enerjisi üretmek amacıyla prototip olarak inşa edilmiş ve önemli bir kısmı halen çalışır durumda olan dalga enerjisi tesisleri ayrıntılı olarak Tablo 2’de verilmektedir. Bunlardan Tip 3a kategorisine giren iki tesis, aynı zamanda dalga kıran (DK) olarak da kullanılmaktadır.

İzmir şartlarında gerçekleştirilen bir analizde (2), Çeşme’nin ortalama dalga gücünün 7,16-39,66 kW/m arasında değiştiği saptanmıştır. Giriş bölümünde dünyanın değişik kıyı ve denizleri için verilen istatistikî dalga gücü değerleri incelendiğinde, Çeşme için saptanan ortalama değerlerin oldukça yüksek olduğu anlaşılır. Ayrıca, Karadeniz’e ait dalga rasatları olmamakla birlikte, ortalama dalga gücünün Çeşme’den daha yüksek olması beklenmelidir.



Şekil 11. Hava basıncını kullanan yüzer sistemler (9)

Tablo 2. Kurulan dalga enerjisi tesislerinin (prototiplerin) genel deęerlendirmesi

<i>Kategori</i>	<i>Dalga türbini</i>	<i>Nominal güç (kW)</i>	<i>Verim veya Birim Enerji Maliyeti</i>	<i>Yer</i>	<i>Tarih</i>
Tip 3b	Yüzer OWC	375 1000 560	-	Japonya Denizi Japonya	1978/79 1979/80 1985/86
Tip 1b	Salınımlı yüzey	30	-	Kattegatt (İsveç)	1983'den beri
Tip 3a	Sabit OWC	500	-	Toftestalen (Norveç)	1985-88
Tip 2a	Tapered channel	350	5,6 €/kWh	Toftestalen (Norveç)	1986'dan beri
Tip 3a	Sabit OWC/DK	150	-	Vizhinjam (Hindistan)	1990'dan beri
Tip 3a	Sabit OWC	75	% 20 - 90	Isle of Islay (İskoçya)	1988'den beri
Tip 3a	Sabit OWC/DK	60	-	Sakata (Japonya)	1988'den beri
Tip 3a	Sabit OWC	40	-	Sakata (Japonya)	1984'den beri
Tip 3a	Sabit OWC/DK	40	% 60	Niigata (Japonya)	1986-88
Tip 1a	Sbt. salınımlı yüzey	20	% 100	Lake Michigan (ABD)	1987
Tip 3a	Sabit OWC	30	-	Kujukuri (Japonya)	1987'den beri
Tip 1a	Sbt. salınımlı yüzey	15	% 40 - 50	Muroran (Japonya)	1984'den beri
Tip 3a	Sabit OWC	3	% 10 - 40	Dawanshan (Çin)	1990'dan beri
Tip 1a	Sbt. salınımlı yüzey	-	-	Miyazu (Japonya)	1991'den beri
Tip 1b	Salınımlı yüzey	1 000 (teorik)	-	- (İngiltere)	1993

Dalga Enerjisi Açısından Türkiye'nin Durumu

Dalgalardaki enerjinin elektrik enerjisine dönüşümünü sağlayan dalga türbinlerinin nominal güçlerinin saptanmasında, mevcut ortalama dalga güç potansiyeli birinci derecede rol oynamaktadır. Elektrik enerjisi üretiminde, mevcut ortalama dalga gücünden daha büyük nominal güce sahip dalga türbinlerinin kullanılması, türbin gücünün büyük bir kısmının atıl kalması sonucunu doğurur. Bu da, birim dalga elektriğinin maliyetini artırır. Dalga türbininin nominal gücünün, mevcut ortalama dalga gücünden küçük olması da, mevcut enerjinin kullanılmaması nedeniyle, dalga elektriğinin ekonomikliğine negatif etki yapacaktır. Birim genişliğe etkiyen ortalama dalga gücü 14,84 kW/m olan Çeşme şartları için; kurulacak olan dalga türbinlerinin nominal güçlerinin 15 kW/m seçilmesinin uygun olacağı anlaşılmaktadır. Karadeniz'de kurulacak santrallerin nominal güçleri, 15 kW/m'nin üzerinde belirlenebilecektir.

5. SONUÇ

Dalga enerjisinden yararlanmaya yönelik olarak, çok çeşitli tasarımlar gerçekleştirilmiştir. Bunların önemli bir bölümü, gerek maliyetleri gerekse de maruz kalacakları kuvvetler ve işletim koşulları nedeniyle proje boyutunda kalmıştır; diğer bir bölümünde ise deneylerden sonra yapılabirliklerinin söz konusu olamayacağı sonucuna varılmıştır. Bu çalışmada, verimleri yüksek ve gerçekleştirilebilir sistemlere tümüyle değinilmiştir; ayrıca avantajlı yönleri vurgulanmıştır.

Türkiye'nin Batı, özellikle Kuzey kıyılarının dalga enerjisi yönünden oldukça zengin olduğu anlaşılmaktadır. Bu kıyılarda özellikle Tip 2a (Tapchan tipi) ve Tip 3a (sabit OWC) sistemleri kurularak, ilgili bölgelerdeki küçük yerleşim birimlerinin elektrik enerjisi gereksinimi sürekli olarak sağlanabilir. Dolayısıyla, Türkiye'de orta vadede yenilenebilir enerji kaynaklarından hidrolik enerjisine destek olunurken, uzun vadede dalga enerjisinden daha fazla yararlanma olanakları geliştirilebilir.

6. KAYNAKLAR

(1) Ültanır, M. Ö: *21. Yüzyıla Girerken Türkiye'nin Enerji Stratejisinin Değerlendirilmesi*, S.80, Yayın No: TÜSİAD-T/98-12/239, 1998.

(2) Özdamar, A.: “Dalga Enerjisinden Elektrik Enerjisi Eldesi Üzerine Bir Araştırma: Çeşme Örneği”, *Su Ürünleri Dergisi*, Cilt No: 17, Sayı:1-2, S.201-213, İzmir, 2000.

(3) Mollison, D.: “Wave climate and the wave power resource”, Proc.: *Hydrodynamics of Ocean Wave Energy Utilization*, S.133-156, 1985.

(4) Pires, H. N.; Pessanha, L. E.: “Wave power climate of Portugal”, Proc.: *Hydrodynamics of Ocean Wave Energy Utilization*, S.157-167, 1985.

(5) Mogridge, G. R.; Funke, E. R.; Baird, W. F.; Mansard, E. P.: “Analysis and description of wave energy resources”, Proc.: *2nd International Symposium on Wave Energy Utilization*, S.55-79, 1982.

(6) Nurick, G. N.; Dutkiewicz, R. K.: “Wave energy of the coast of Southern Africa”, Proc.: *International Wave and Tidal Energy*, S.1-14, 1978.

(7) Li, G.; Gou, J.: “Progress in China's developmental research on wave energy, Proc.: *Hydrodynamics of Ocean Wave Energy Utilization*, S.125-132, 1985.

(8) Hartkopf, Th.: *Regenerative Energien*, Vorlesungsmanuskript WS 98/99, S.5.12-5.17 Technische Universität Darmstadt.

(9) Graw, K.-U.: *Wellenenergie – Eine hydromechanische Analyse*, Institut für Grundbau, Abfall- und Wasserwesen, Bergische Universität – Gesamthochschule Wuppertal, ISSN 0179-9444, 1995.

(10) Sabuncu, T.: 1983. *Gemi Hareketleri*, S. 412, İTÜ Kütüphanesi, No:1248.