

ME 331
YENİLENEBİLİR ENERJİ
SİSTEMLERİ

DALGA VE GEL-GİT
ENERJİLERİ

Ceyhun Yılmaz
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Dalga Enerjisi (WAVE ENERGY)

- Diğer yenilenebilir enerji kaynaklarının çoğunda olduğu gibi, dalga enerjisi de nihayetinde güneş enerjisinden kaynaklanmaktadır.
- Okyanus ve deniz dalgaları rüzgârdan kaynaklanır ve rüzgar, yeryüzü ve su kütlelerinin eşit olmayan solar ısınmasından ve bunun sonucunda ortaya çıkan sıcaklık dalgalanmalarından kaynaklanır.
- Yer kürenin dönmesi de rüzgar oluşumuna ve dolayısıyla dalga enerjisine sebep olan bir faktördür.
- Dalga enerjisi, dalgadan sürdürülebilir bir güç üretimi yöntemi olarak elde etmeye çalıştığımız için dalga gücü (wave power) olarak da adlandırılır.
- Dalga enerjisine olan ilgi 1970'lerde enerji krizinden başlayarak, bu enerjinin yenilenebilir olması ve yüksek potansiyeli ile bu enerjinin bedava olması gerçeğinden dolayıdır.
- Okyanus ve deniz dalgalarından güç üretme muazzam potansiyelini, sahillerde her yıl ortalama 3 milyon dalganın kırıldığını düşünürsek anlayabiliriz.

- Dalga enerjisi dönüşümüne yönelik teknolojiler, teknik, pratik ve ekonomik problemler nedeniyle hala gelişim aşamasındadır.
- **Dalga güç dönüşümünün bazı problemler:** Dünya çapında birçok büyük dalga aktivitesi alanı vardır, ancak bu bölgelere erişim genellikle sınırlıdır.
- Dalga enerjisi bölgeleri genellikle nüfusun ve endüstrinin olduğu bölgelerden uzak ve bazen de güç şebekelerinden uzaktır. Bu durum üretilen elektriği iletmenin zor ve pahalı olması demektir.
- Dalga enerjisini elektriğe çevirmek için kullanılan ekipmanlar büyük ve karmaşıktır. Denizdeki güçlü hareketlere dayanacak yüksek yapısal ve mekanik güce sahip olmaları gerekir.
- Makul miktarda güç üretimi için çok büyük ekipman gereklidir. Bu nedenle, dalga güç sistemleri yüksek maliyet yatırımları ve yüksek bakım masrafları içerir. Sonuç olarak, dalga enerjisi güç üretim maliyeti geleneksel fosil yakıtlara veya yenilenebilir enerji sistemlerine göre oldukça yüksektir.
- Dalga güç sistemlerinin deniz yaşamına etkisi de bir sorun olabilir.

- Dünyada dolaşan bir kişi, bazı okyanus ve deniz alanlarının diğer sahalara kıyasla daha fazla dalga ve daha yüksek dalga yüksekliği içerdiğini gözlemleyebilir. Bu yerler genellikle rüzgar sörfçüleri çeker.
- **Bu tür bilinen yerlerden bazıları şunlardır:**
- Hawaii adalarındaki Molakai ve Alenuihaha kanalları
- Kuzey Amerika Pasifik Kıyıları
- Pakistan ve Hindistan'dan Arap Denizi
- İskoçya'nın Kuzey Atlantik kıyısı
- ABD'deki New England Sahili
- Bu sahalar 1 ila 5 m dalga yükseklikleri içerir. Bu sahaların bir incelemesi, yaklaşık 6 saniyelik bir süre ile 2 m yüksekliğindeki dalgalardan daha fazla zamanın yarısını ortaya çıkarmaktadır.

Dalgalardan Güç Üretimi

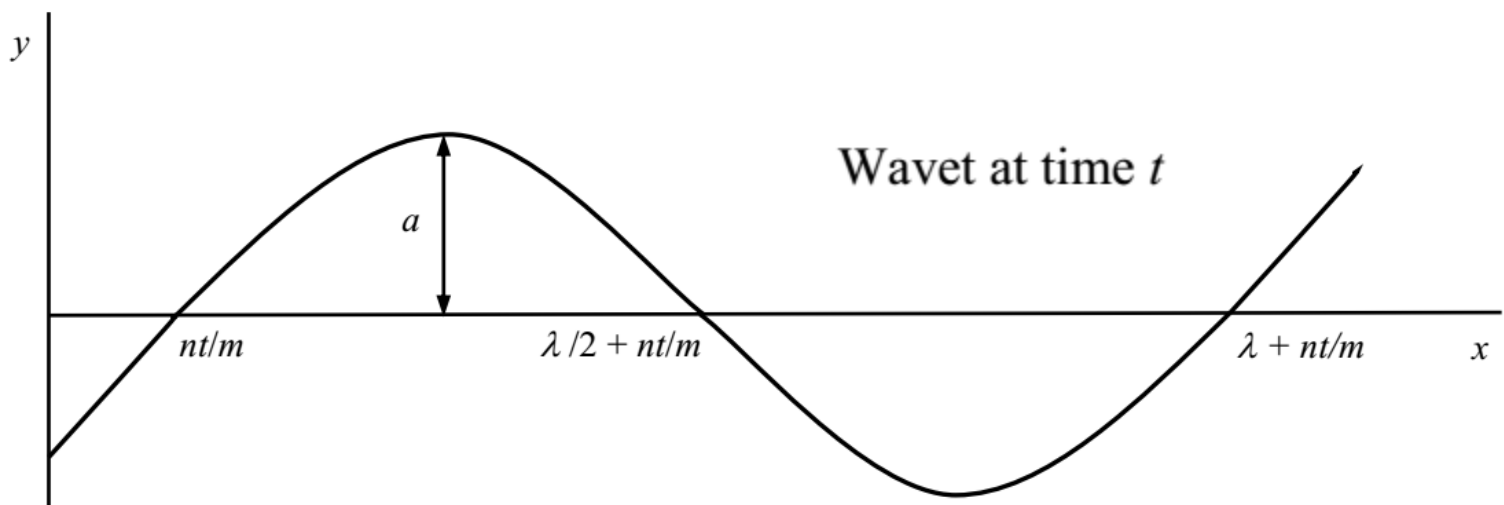
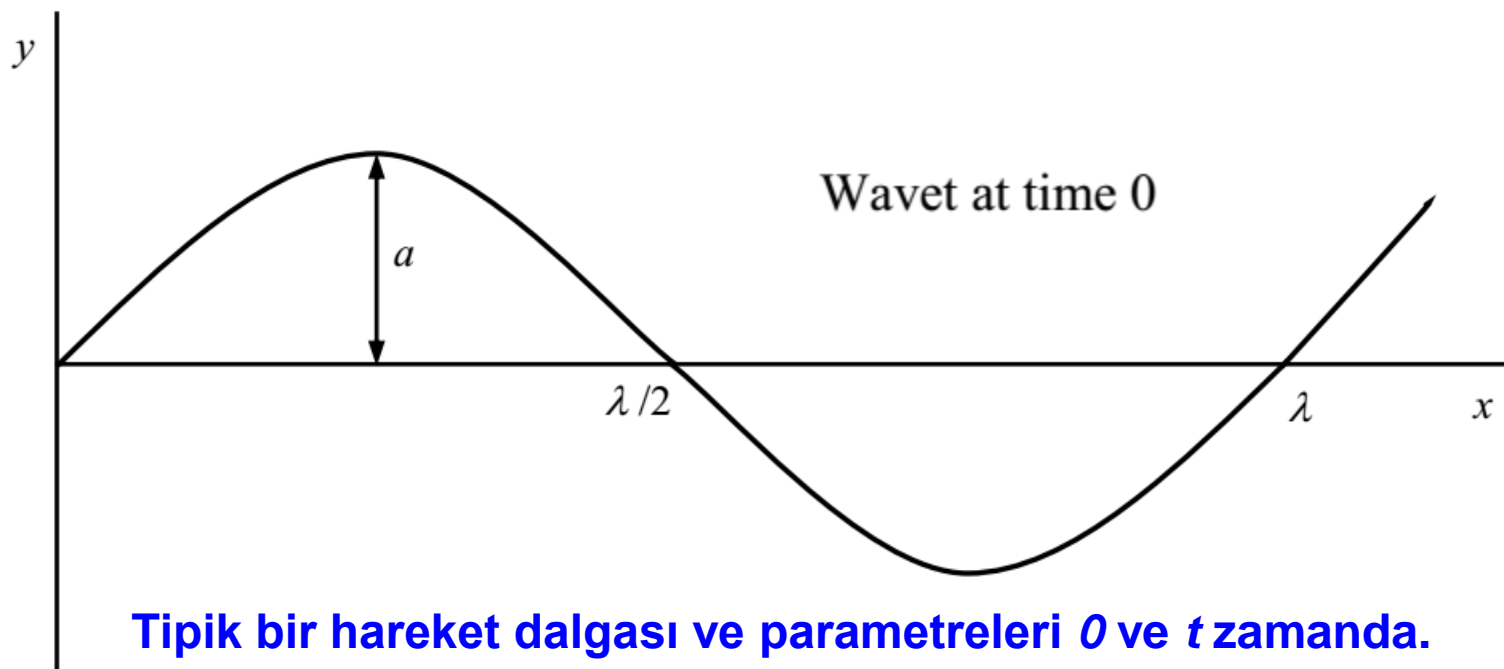
- Okyanus ve deniz dalgalarından ne kadar enerji elde edilebilir? Dalga enerjisinden ne kadar güç üretilebilir?
- Bir dalga için, dalga boyu ve periyod arasındaki ilişki:

$$\lambda = 1.56\tau^2$$

- Burada dalga boyu λ ve birimi m, period τ birimi s. Bir dalganın aldığı yol şöyle ifade edilebilir:

$$y = a \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \frac{2\pi}{\tau}t\right)$$

where y is height above mean sea level in m, a is amplitude in m, and t is time in s.



$n = 2\pi/\tau$ represents phase rate in 1/s, $m = 2\pi/\lambda$ and $m x - n t = 2\pi (x/\lambda - t/\tau)$ represents phase angle, which is dimensionless. After an initial time of $t = 0$, the wave is repeated after a period of $t = \tau$.

- Dalga hareketi yatay yönde (x-yönü) ve dalga hızı şu şekilde verilir:

$$V = \frac{\lambda}{\tau}$$

- Su tam olarak bir dalga gibi akmaz. Bunun yerine, bir su damlası yatay ve dikey eksenlerde dalga yayılım düzleminde eliptik bir yolda döner. Su parçacıklarının yolları, Şekil 6-23'te gösterilmiştir. Elipslerin yatay ve dikey yarı eksenleri:

$$\alpha = a \frac{\cosh m\eta}{\sinh mh}$$

$$\beta = a \frac{\sinh m\eta}{\sinh mh}$$

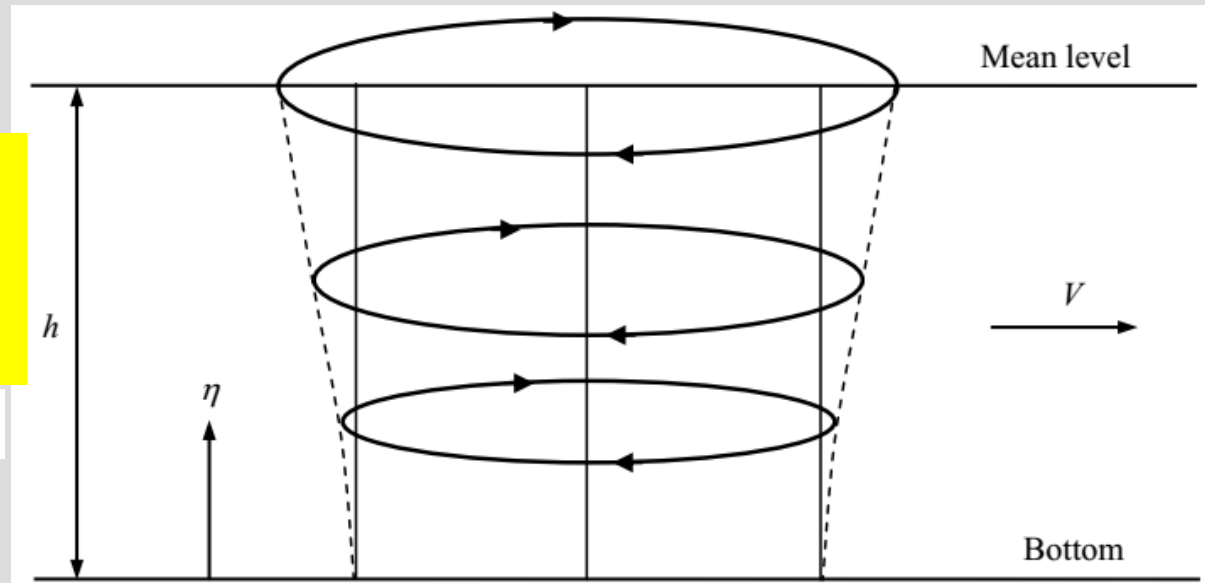
where h is depth of water in m, and η is distance from the bottom. The amplitude is half of water height: $2a = h$.

Yatay yarı eksen α 'nın normalde dikey yarı eksen β dan daha büyük olduğunu unutmayın.

when $\eta = 0$, $\beta = 0$ (bottom of water)

when $\eta = h$, $\beta = a$ (surface of water)

for large depths, $\alpha \approx \beta \approx a$



where h is depth of water in m, and η is distance from the bottom. The amplitude is half of water height: $2a = h$. Note that horizontal semiaxes α is normally greater than vertical semiaxes β . Also,

when $\eta = 0$, $\beta = 0$ (bottom of water)

when $\eta = h$, $\beta = a$ (surface of water)

for large depths, $\alpha \approx \beta \approx a$

A wave has speed and height, and therefore a wave has both kinetic and potential energies, and the total energy of a wave is the sum of its potential and kinetic energies. The potential energy is due to elevation of the water with respect to $y = 0$ in Fig. 6-22. For a differential volume of ydx , its mean height is $y/2$. Then, the potential energy is expressed as

$$dPE = m \frac{yg}{2} = (\rho y dx L) \frac{yg}{2} = \frac{\rho L}{2} y^2 dx g \quad (6-37)$$

where $m = ydx$ is mass of liquid in kg, g is acceleration due to gravity in m/s^2 , ρ is density in kg/m^3 , and L is arbitrary width of the two-dimensional wave, perpendicular to the direction or wave propagation x in m. Combining Eq. 6-37 with 6-33, and integrating gives

$$PE = \frac{1}{4} \rho a^2 \lambda L g \quad (J) \quad (6-38)$$

Potential energy per unit area can be obtained dividing Eq. 6-38 by the area $A = \lambda L$, resulting

$$pe = \frac{1}{4} \rho a^2 g \quad (J/m^2) \quad (6-39)$$

Kinetic energy of the wave is due to velocity of the water contained in one complete wavelength. From hydrodynamic theory, the kinetic energy is given by (Lamb, 1932)

$$KE = \frac{1}{4} i \rho L g \int \omega d \varpi \quad (J) \quad (6-40)$$

where ω is a complex potential given by

$$\omega = \frac{ac}{\sinh mh} \cos(mz - nt) \quad (6-41)$$

Here, z is distance measured from a reference point. The integral in Eq. 6-40 over the entire water body gives

$$\text{KE} = \frac{1}{4} \rho a^2 \lambda L g \quad (\text{J}) \quad (6-42)$$

Kinetic energy per unit area can be obtained dividing Eq. 6-42 by the area $A = \lambda L$, resulting

$$ke = \frac{1}{4} \rho a^2 g \quad (\text{J/m}^2) \quad (6-43)$$

Therefore, kinetic and potential energies of a traveling wave are identical, and the total wave energy per unit area (i.e., energy density) is

$$e_{\text{wave}} = pe + ke = \frac{1}{2} \rho a^2 g \quad (\text{J/m}^2) \quad (6-44)$$

This is in fact the energy potential of a wave or available work from a wave:

$$w_{\text{available}} = \frac{1}{2} \rho a^2 g \quad (\text{J/m}^2) \quad (6-45)$$

Finally, the wave energy per unit time (i.e., power per unit area or power density) can be obtained by multiplying Eq. 6-44 by the frequency f . The frequency is defined as the reciprocal of period $f = 1/\tau$. Then,

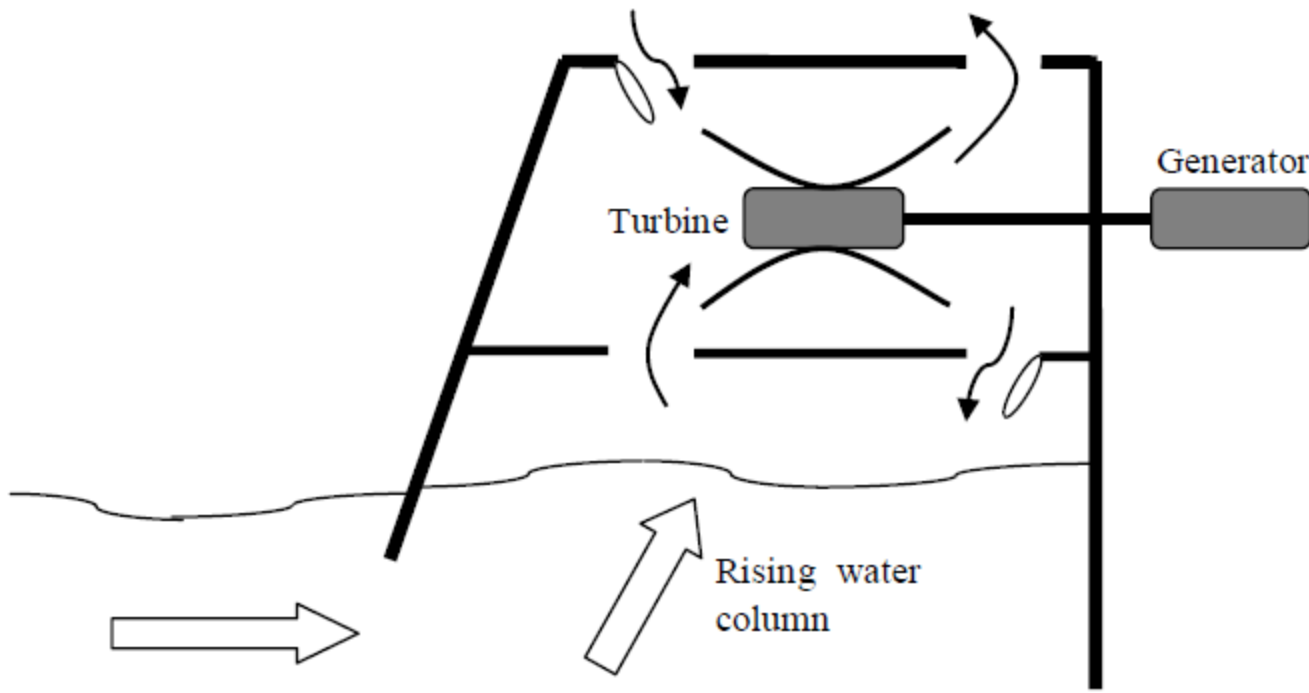
$$\dot{e}_{\text{wave}} = \frac{1}{2} f \rho a^2 g = \frac{1}{2\tau} \rho a^2 g \quad (\text{W/m}^2) \quad (6-46)$$

This is the power potential of a wave or available power from a wave:

$$\dot{w}_{\text{available}} = \frac{1}{2\tau} \rho a^2 g \quad (\text{W/m}^2) \quad (6-47)$$

Dalga Güç Teknolojileri

- Dalga enerjisi dönüşümü için çeşitli sistemler ve teknolojiler önerilmiştir. İki ana teknoloji şöyledir:
- (1) Dalga suyun enerjisini havaya transfer etmek ve bir türbini çalıştırmak için sıkıştırılmış havayı kullanmak.
- (2) Bir hidrolik türbini çalıştırmak veya bir su deposunda dalga suyunu toplamak ve bir türbini çalıştırmak için rezervuardan akan suyu kullanmak için dalga su kullanılması.



Konteynırda hava sıkıştırılır. Basınçlı hava, elektriğın üretildiğı bir jeneratöre bağı olan türbini döndürür.

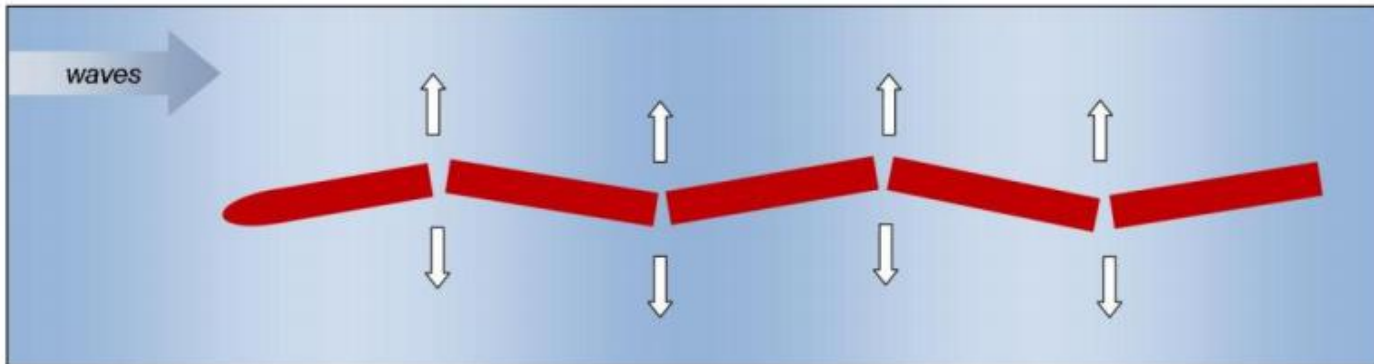
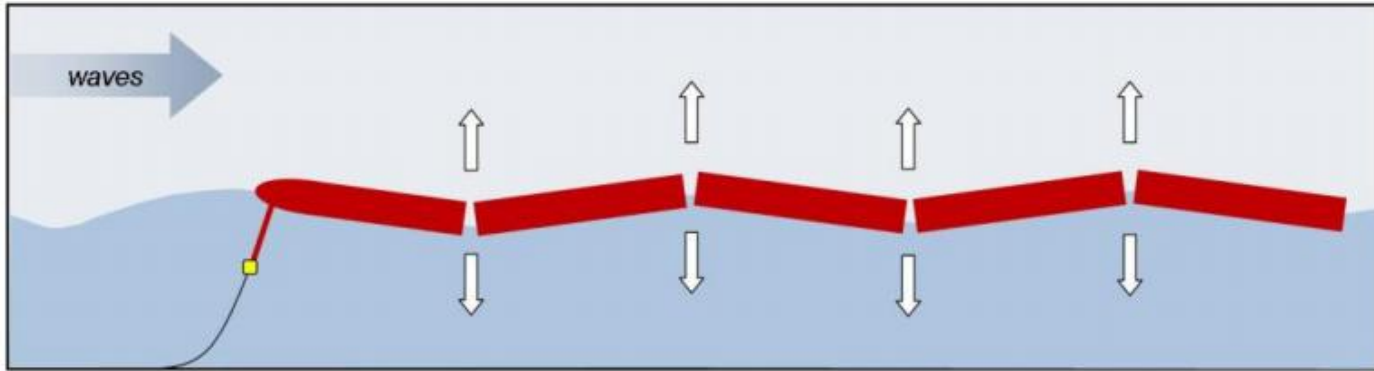
FIGURE 6-24 Oscillating water column technology for wave power conversion (Adapted from Hodge, 2010 and www.wavegen.co.uk)

The first breakwater power plant with a rating of 300 kW was installed in 2011 on the Spanish Atlantic coast at Mutriku. The plant was built into the breakwater around the harbor. The power plant has 16 identical turbines. Since the cost of breakwater is handled by the local municipality the cost of the plant is relatively low. This plant is claimed to be the only commercial wave power plant in the world (www.wavegen.co.uk).

İlk kategoriye, bir ticari şirket salınan su sütunu teknolojisi olarak kullanılmaktadır.

- Salınan su sütunu teknolojisi üç tip kıyı dalgası enerji santraline uygulanabilir:
- **Shore hattı enerji santralleri:** Tesis denize açık bir kolektör yapısı ile kıyıya kurulmuştur. Odadaki hava, hareketli ve geri dönen dalgalar tarafından sıkıştırılır ve sakinleştirilir. Kıyı hattı enerji santrallerinin güç çıkışları, dalgaların büyüklüğüne ve yatırımın büyüklüğüne bağlı olarak birkaç yüz kilowatt'tan birkaç megawatt'a kadar değişebilir.
- **Yakın kıyı elektrik santralleri:** Bu durumda, tesis, yaklaşık 10 m derinliğindeki sahil şeridinden birkaç yüz metre uzağa monte edilir. Toplayıcı karaya bir barajla bağlanır. Güç değerleri, dalgaların ve santralin büyüklüğüne bağlı olarak 10 ila 100 MW arasında değişir. Devlet teşvikleri ile, bu tesisler ekonomik olarak çalışabilir.
- **Dalgakıran enerji santralleri:** Dalga güç santrallerinin maliyetini düşürmek için, tesis, liman dalgakıranı veya kıyı koruma projesi gibi bir kıyı yapısına entegre edilmiştir. Bu şekilde 10 MW'tan fazla güç değerleri elde edilebilir. **300 kW'lık bir kapasiteye sahip ilk dalgakıran enerji santrali, Mutriku'daki İspanyol Atlantik kıyısında 2011 yılında kuruldu.**

Dalga enerjisi dönüşümü için başka bir ticari teknoloji, bir güç makinesini sürmek için dalga suyunun kullanılmasını içerir. Bu ticari dalga güç makinesi aşağıdaki gibi çalışır (www.pelamiswave.com): Makine, Şekil 6-25'te gösterildiği gibi, iki yönde esnemeye izin veren derzlerle bağlanan beş boru bölümden oluşur. Makine suyun yüzeyine daldırılmış yüzer. Hareketli dalgaların yönü ile karşı karşıya. Güç sistemleri her bir boru eklemesinin içine yerleştirilmiştir. Dalgalar bükülmüş tüplerde hareket ettikçe, hareketli su hidrolik güç aktarma sistemlerini tahrik eder. Üretilen güç denizaltı kabloları ve ekipmanları kullanılarak kıyıya aktarılır. Hidrolik silindirler, PTO tahrik sistemini tahrik eder. Hidrolik silindirler su hareketine ve pompa akışkanına yüksek basınç akümülatörlerine direnir. Bu şekilde güç üretimi süreklidir.



Bu dalga güç teknolojisinde, makine, suyun 50 m derinliğinde veya daha fazla olduğu kıyıdan yaklaşık 2 ila 10 km uzaklıktadır (Şekil 6-26). Standart bir makine 750 kW gücündedir, ancak ortalama üretim bu nominal gücün yaklaşık yüzde 25 ila 40'ını oluşturmaktadır. Bu makine 150 m uzunluğundadır ve boru çapı 3,5 m'dir. Bir sistemin yılda% 40 kapasite oranında 2.7 GWh elektrik üreteceği tahmin edilmektedir.



FIGURE 6-26 A wave power system using Pelamis technology (www.pelamiswave.com)

- Şu anda, bu teknolojinin konvansiyonel güç üretiminde maliyet olarak rekabet edebilecek hale gelmesi için önemli teşviklere ihtiyacı vardır. İyileştirme ihtiyacı olan alanlar; enerji dönüşüm verimliliğini, daha ekonomik yapısal malzemeleri, makine parçalarının standart üretimi ve geliştirilmiş kontrol sistemlerini en üst düzeye çıkarmak için sistem konfigürasyonunun optimizasyonudur.

GELGİT ENERJİSİ

- Gelgitlerdeki enerji kullanılarak da güç üretilebilir. Bir rezervuar yüksek gelgit tarafından şarj edilebilir ve düşük gelgit tarafından deşarj edilebilir. Su haznenin içine ve dışına akarken, güç üretmek için bir hidrolik türbin içinden geçer. Bu, her iki sistem de suyun potansiyel enerjisini kullandığı için hidroelektrik santraline benzer.
- Okyanus ve deniz suyunun gelgit hareketi, ayın ve güneşin yerçekim gücüne bağlıdır. Bu kuvvetler, dünyanın dönmesi nedeniyle sudaki merkezkaç kuvvetini dengeler. Gelgitler sürekli değildir ve tutarlı bir kalıpları yoktur. Zamanlama yükseklikleri günden güne değişir. Ayrıca, dünyanın yeri ile de değişir. Bazı sahil bölgelerinde daha yüksek gelgit yüksekliklerine sahip gelgit hareketleri vardır ve bazıları daha az gelgit hareketine sahiptir. Diğer okyanus enerjisi sistemlerinde olduğu gibi, enerji de ücretsizdir, ancak sistemler önemli miktarlarda güç çıkışı için çok büyük olmalıdır. Bu çok büyük sermaye yatırımlarına karşılık gelir.

- Gelgit programı, dünya etrafında 24 saat 50 dakika süren ay hareketine dayanır. Gelgitler, bir ay içinde iki kez yükselir ve düşer, ve böylece tam bir gelgit döngüsü 12 saat ve 25 dakika sürer. Gelgit aralığı (yüksek gelgit ve düşük gelgit arasındaki su yükselmesi farkı) 29.5 gün olan bir ay boyunca değişir. Şekil 6-27, gelgit aralığının tipik bir ay ayında nasıl değiştiğini gösterir. Yeni ay ve dolunay boyunca gerçekleşene *yüksek gelgit* denilir ve maksimumdur. İlk ve üçüncü çeyrek civarında, menzil minimumdur ve buna *küçük gelgit* denir. Ortalama bir menzil, gelgitin yaklaşık üçte biri kadardır.
- Gelgit aralıkları, yerkürenin konumu, kıyı şeridinin profili ve su derinliği ile değişir. Kurulum menziline daha iyi bir şekilde kanıtlamak için yüksek güçte konumlar gelgit güç üretimi için daha uygundur.
- Bu sahil şeridi, tipik olarak 10 m'den daha büyük olan gelgit aralıklarına sahiptir. Yeryüzündeki geri kazanılabilir gel-git gücü potansiyelinin yaklaşık 1,5 milyon MW olduğu tahmin edilmektedir. Halihazırda dört gel-git sistemi, 260 MW'ın üzerinde toplam güç değerine sahiptir (Gorlov, 2001). En büyük olanı 240 MW gücünde ve 8.6 m ortalama gelgit yüksekliğiyle Fransa'nın La Rance şehrinde bulunuyor. 24 benzer türbin var. Tesis 1967 yılında inşa edilmiş olup, yılda yaklaşık 600 milyon kWh elektrik üretirken halen faaliyet göstermektedir. Bu, yaklaşık yüzde 30'luk bir kapasite faktörüne karşılık gelir. İkinci en büyük olanı ise Kanada'nın Annapolis kentinde 18 MW güç ve ortalama dalga yüksekliği 6.4 m.

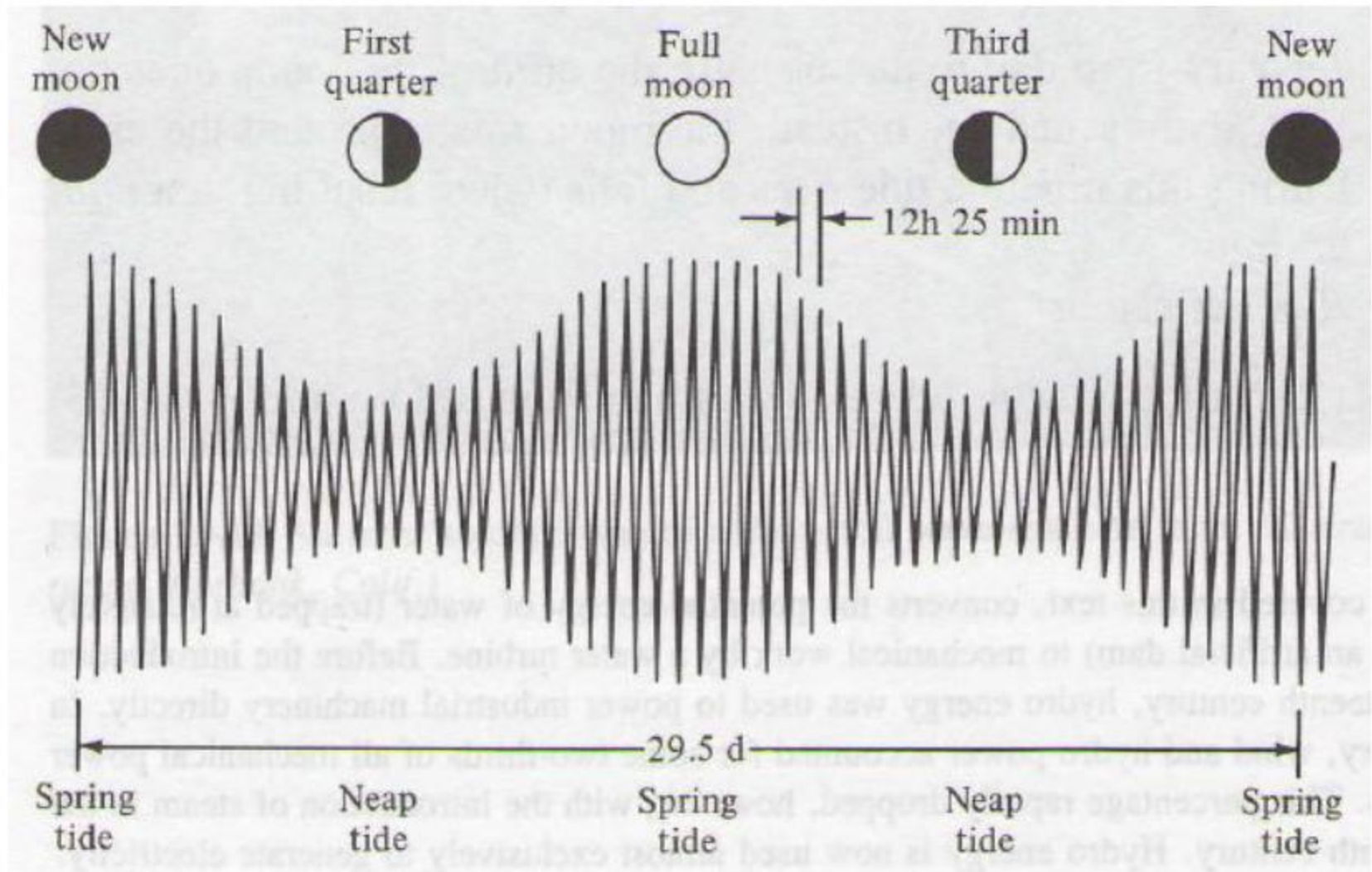


FIGURE 6-27 Variation of tidal range in a typical lunar month (El-Wakil, 1984)

Gel-git enerjisinin güç potansiyelini tahmin etmek için, El-Wakil (1984) 'de verilen prosedüre dayanarak, Şekil 6-28'de gösterildiği gibi basit bir tek havuz tidal sistemini düşünülebilir.

percent. The second largest one is installed in Annapolis, Canada with a power rating of 18 MW and average tide height of 6.4 m.

In order to estimate power potential of tidal energy, consider a **simple single-pool tidal system**, as shown in Fig. 6-28 based on the procedure given in El-Wakil (1984). The potential energy or work potential of a differential element dm is

$$dW = gdmh \quad (6-48)$$

where h is the height or head of the differential element and

$$dm = -\rho A dh \quad (6-49)$$

where ρ is the density of water and A is surface area of the pool. Substituting,

$$dW = -g\rho A h dh \quad (6-50)$$

Integrating this expression during a full emptying or filling period gives the total work potential

$$W = \int_R^0 -g\rho A h dh = -g\rho A \int_R^0 h dh$$

which gives

$$W_{\text{available}} = \frac{1}{2} g\rho A R^2 \quad (J) \quad (6-51)$$

where R is tidal range. This is theoretical amount of work that can be produced by tidal energy with a range R . The power potential or available power is available work over the time period:

$$\dot{W}_{\text{available}} = \frac{W}{\Delta t} = \frac{1}{2\Delta t} g\rho A R^2 \quad (W) \quad (6-52)$$

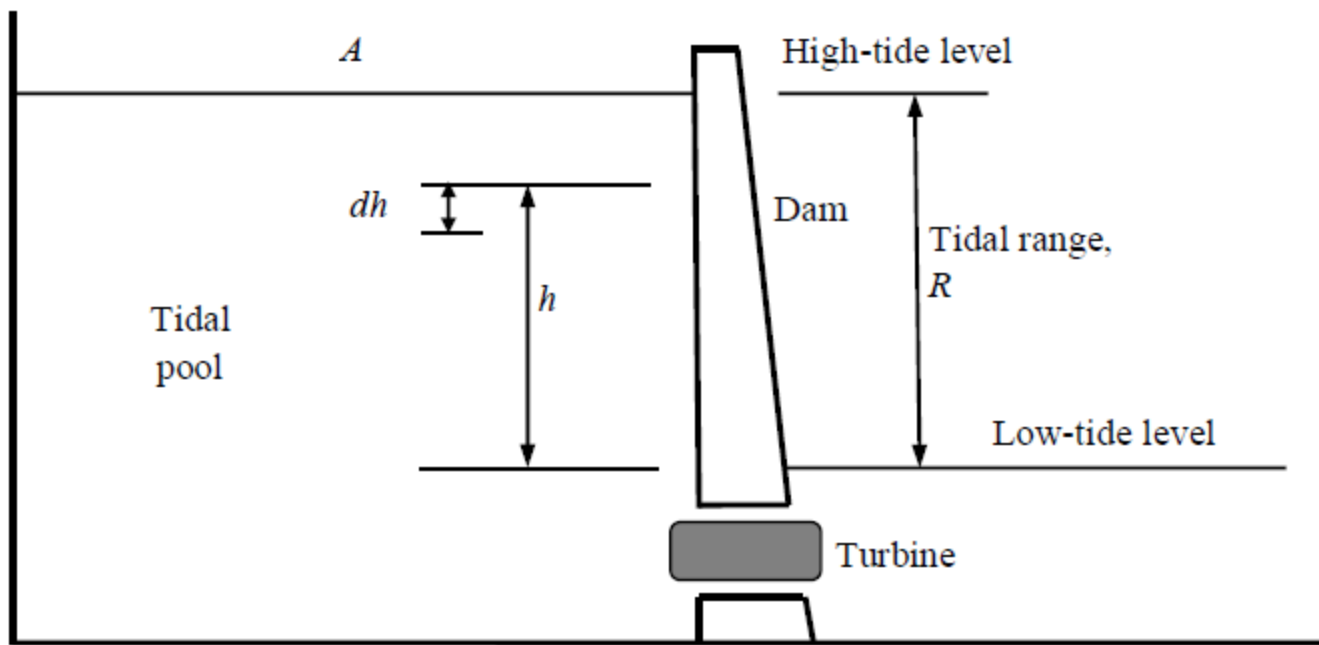


FIGURE 6-28 A single-pool tidal system for tidal power generation (Adapted from El-Wakil, 1984)

Each full tidal cycle lasts 12 h and 25 min and each emptying or filling process takes a period of 6 h and 12.5 min or 6.2083 h, or 22,350 s. Also, the density of sea water can be taken to be 1025 kg/m^3 . Therefore, the average power potential is expressed as

$$\dot{W}_{\text{available}} = \frac{1}{2\Delta t} g\rho AR^2 = \frac{1}{2(22,350 \text{ s})} (9.81 \text{ m/s}^2)(1025 \text{ kg/m}^3)AR^2 \quad (\text{W})$$

Or $\dot{W}_{\text{available}} = 0.225 AR^2 \quad (\text{W}) \quad (6-53)$

Based on the units used to obtain Eq. 6-53, when area A is in m^2 and range R is in m, this equation gives power in W. For a unit surface area and a tidal range of 10 m, the power would be

$$\dot{W}_{\text{available}} = 0.225 AR^2 = 0.225(1 \text{ m}^2)(10 \text{ m})^2 = 22.5 \text{ W}$$

Therefore, the power potential of a 10-m-high tide is only 22.5 W/ m^2 . Note that the power generation in a tidal system is not continuous. The system generates power only during emptying period of the tidal pool.

The Bay of Fundy in Canada has an area of 13,000 km^2 with an average range of 8 m. The tidal power potential is then

$$\dot{W}_{\text{available}} = 0.225 AR^2 = 0.225(13,000 \times 10^6 \text{ m}^2)(8 \text{ m})^2 = 1.872 \times 10^{11} \text{ W}$$

or 187,200 MW. This is a huge amount of power potential. Because of the frictional losses, and turbine and generator inefficiencies, actual power will be less. Assuming a conversion efficiency of 30 percent, the actual power potential becomes 56,000 MW, which is still very high.

A good strategy for emptying the pool is to do this slowly over the time. This is called a **modulated single-pool tidal system**. The average head in this case is less than the tidal range and the instantaneous power output is reduced in comparison to fast emptying of the pool. This strategy reduces power fluctuations, and as a result, smaller turbine-generator units can be used with longer power generation periods. According to this operation module, the work potential for a tidal cycle is evaluated from (El-Wakil, 1984)

$$W_{\text{available}} = g\rho AR^2 \left\{ 0.988a \left[\cos\left(\frac{\pi t_1}{6.2083}\right) - \cos\left(\frac{\pi t_2}{6.2083}\right) \right] - \frac{a^2}{2}(t_2^2 - t_1^2) \right\} \quad (\text{J}) \quad (6-54)$$

where a is a constant in 1/s and it controls the slope of the pool filling, and t_1 and t_2 are initial and final time of work production in h. In Eq. 6-54, the value 6.2083 h represents the period of a filling or emptying process of the pool.

It can be shown that the work production given for a modulated single-pool system (Eq. 6-54) is much lower than that given by a simple single-pool system (Eq. 6-51). However, Eq. 6-51 is applicable for fast emptying of the pool with high power rating but the period of power production is very short. Large turbines and generators should be installed to match the high power rating. This also has negative effect on the power grid. In the slow emptying of tidal pool, as represented by Eq. 6-54, less power is produced over longer periods of time.

Equations 6-51 and 6-54 give work potential or available work for simple and modulated single-pool systems, respectively. The actual work output can be obtained by defining a tidal system efficiency as

$$\eta_{\text{tidal}} = \frac{W_{\text{actual}}}{W_{\text{available}}} \quad (6-55)$$

Efficiency of tidal power systems can be taken to be around 30 percent.