

# Nove tehnologije elektrana na morske struje i valove

---

**Maskaljević, Josip**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2018**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:625186>

*Rights / Prava:* [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-09-21**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET**

**Sveučilišni studij**

**NOVE TEHNOLOGIJE ELEKTRANA NA MORSKE  
STRUJE I VALOVE**

**Diplomski rad**

**Josip Maskaljević**

**Osijek, 2018.**

## Contents

|   |    |
|---|----|
| 1. UVOD .....   | 1  |
| 2. TEORIJA I ENERGIJA VALOVA .....  | 2  |
| 2.1. Definicije i simboli .....   | 2  |
| 2.2. Linearna teorija valova .....  | 3  |
| 2.2.1. Osnovne jednačbe .....   | 3  |
| 2.2.2. Sinusoidalni valovi na dubokoj vodi .....  | 6  |
| 2.2.3. Sinusoidalni valovi na vodi proizvoljne, ali jednolike dubine .....                      | 10 |
| 2.2.4. Energija vala i valni energetski fluks .....   | 14 |
| 2.2.5. Nepravilni valovi .....  | 17 |
| 2.2.6. Značajna visina vala, srednje vrijeme vala .....   | 21 |
| 2.2.7. Energetski fluks .....   | 22 |
| 3. TEHNOLOGIJE ZA ISKORIŠTAVANJE ENERGIJE VALOVA .....  | 23 |
| 3.1. Povijest korištenja energije valova .....  | 23 |
| 3.2. Geografski potencijal korištenja energije valova .....                                     | 25 |
| 3.3. Tehnologije za iskorištavanja energije valova .....  | 27 |
| 3.3.1. Oscilirajući vodeni stupac (OWC) .....   | 28 |
| 3.3.2. Sustavi oscilirajućih tijela .....   | 35 |
| 3.3.3. Preljevajući pretvarači (eng. <i>Overtopping converters</i> ) .....                      | 47 |
| 4. TEHNOLOGIJE ZA ISKORIŠTAVANJE ENERGIJE PLIME I OSEKE .....                                   | 50 |
| 4.1. Potencijal korištenja energije plime i oseke .....   | 50 |
| 4.2. Povijest korištenja elektrana na plimu i oseku .....                                       | 51 |
| 4.3. Princip rada .....   | 52 |
| 4.4. Tehnologije za iskorištavanje energije plime i oseke .....                                 | 53 |
| 5. UČINKOVITOST PRETVORBE VALNE ENERGIJE U JADRANSKOM MORU, ZA RAZLIČITE VALNE PRETVARAČE ..... | 58 |
| 5.1 Uvod .....  | 58 |
| 5.2. Procjena valne energije u blizini otoka Palagruže .....                                    | 59 |
| 6. ZAKLJUČAK .....  | 64 |
| LITERATURA .....  | 65 |
| SAŽETAK .....   | 70 |
| ŽIVOTOPIS .....   | 71 |

## 1.UVOD

Zadatak ovog diplomskog rada je prikazati i opisati tehnologije za proizvodnju električne energije iz energije valova i morskih struja, te usporediti učinkovitost različitih tipova tehnologija.

U drugom poglavlju su opisani valovi preko linearne teorije valova. Tu su prikazane osnovne veličine koje opisuju valove, zatim opisane su vrste valova (pravilni i nepravilni), te energija i energetska fluks vala.

U trećem poglavlju su opisane tehnologije za proizvodnju električne energije iz energije valova. Prvo je prikazana povijest razvoja tehnologija i potencijal u svijetu. Zatim je prikazana podjela ovih tehnologija, te objašnjen princip rada svakog tipa. Također su prikazani i mnogi primjeri svakog tipa ovih tehnologija.

U četvrtom poglavlju su opisane tehnologije za proizvodnju električne energije iz energije plime i oseke. Također je prvo prikazana povijest i potencijal za iskorištavanje ove energije. Nakon toga je opisan princip rada različitih tipova ovih tehnologija, te je prikazana podjela i primjeri za svaki tip ovih tehnologija.

U petom poglavlju je analizirana učinkovitost pretvorbe energije valova na jednom mjestu u Jadranskom moru. Za analizu su korištena tri različita tipa tehnologija valnih pretvarača.

## 2. TEORIJA I ENERGIJA VALOVA

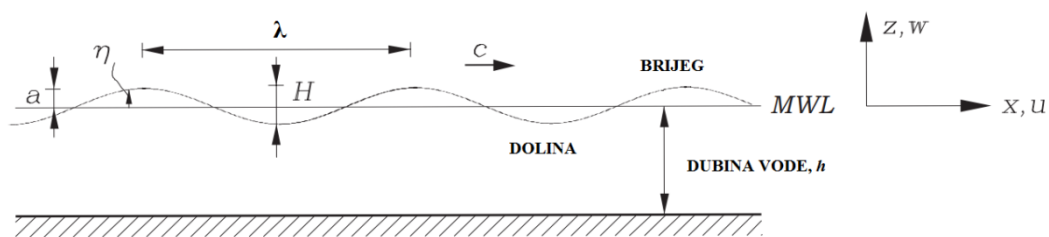
Valovi uzrokovani vjetrom počinju djelovati na površini pri brzini vjetra oko 1 m/s, gdje se energija vjetra djelomično pretvara u energiju valova preko površinskog smicanja. Povećanjem visine vala, pretvorba vjetar-val energije je još efektivnija zbog veće hrapavosti. Površina mora nad kojom puše vjetar se može okarakterizirati kao vrlo nepravilna površina, gdje se valovi neprekidno podižu i nestaju. Manji valovi se preklapaju sa većim valovima i valovi putuju različitom brzinom i dijelom u različitom smjeru. Detaljni opis se čini nemogućim i zato je potrebno uraditi neka pojednostavljena, što će omogućiti opisivanje većih promjena u karakteristikama valnog uzorka.

Valovi su podijeljeni u dvije klase u ovisnosti o njihovom usmjerenom širenju:

- Valovi dugačkog brijega: dvodimenzionalni (ravni) valovi (npr. valovi na blago nagibnim obalama). Valovi su dugačkog brijega i putuju u istom pravcu (npr. okomito na obalu).
- Valovi kratkog brijega: trodimenzionalni valovi (npr. valovi nastali djelovanjem vjetra i oluje). Valovi putuju u različitim smjerovima i imaju relativno kratak brijeg.

U ostatku ovog poglavlja razmatrat će se prvo valovi dugačkog brijega, a zatim i valovi kratkog brijega. Također, treba imati na umu da u stvarnosti većina valova su kratkog brijega. Valovi će se opisati preko linearne valne teorije.

### 2.1. Definicije i simboli



Sl. 2.1. Prikaz vala sa pripadajućim veličinama

Na slici 2.1. se nalazi shematski prikaz vala sa veličinama koje ga opisuju. Na slici se može vidjeti valni brijeg i valna dolina, te sljedeće veličine:

$H$ - visina vala

$a$ -amplituda vala

$\zeta$ - elevacija vodene površine

$\lambda$ - valna duljina

$s=H/\lambda$  - strmina vala

$c=\lambda/T$  – valna brzina

$T$ - valni period, vrijeme između dva brijega istog vertikalnog dijela

$u$ - horizontalni dio vektora brzine

$w$ -vertikalni dio vektora brzine

$k=2\pi/\lambda$  – valni broj

$\omega=2\pi/T$  – kružna frekvencija, kutna frekvencija

$h$ - dubina vode

## **2.2. Linearna teorija valova<sup>1</sup>**

### **2.2.1. Osnovne jednadžbe**

Valovi koji se ovdje proučavaju su poremećaji ravne površine između vode i zraka u moru ili oceanu. Ovi valovi se također nazivaju gravitacijskim valovima zato što gravitacija djeluje na njih. Najčešće se poremećaji događaju uslijed puhanja vjetra iznad vodene površine, ali postoje i mnogi drugi razlozi kao npr. zbog nekih tijela koja se kreću u vodi, potresi itd.. Napetost površine je dodatna sila koja djeluje tako da nastoji dovesti morsku površinu u ravnotežu nakon djelovanja valova. Ona je zapravo bitna samo za male valove, dužine manje od 10 cm. Ovdje se neće proučavati takvi slučajevi.

U teoriji gravitacijskih valova koji se događaju na homogenoj masi vode, stlačivost je neznatna i zato se gustoća vode može uzeti kao konstanta  $\rho$ . Također će se zanemariti viskoznost i ostale disipativne posljedice.

---

<sup>1</sup> odlomci od 2.2.1. do 2.2.4. se većinom temelje na 3. poglavlju knjige „Waves in Fluids“ od J. Lighthill [1], i u puno manjem opsegu, na [2]

Uzima se kartezijski koordinatni sustav  $(x,y,z)$  gdje je  $z$  u smjeru vertikalno prema gore sa neuznemirene površine, dok sa  $p(x,y,z)$  označavamo tlak u vodi. U odsustvu valova, nesmetana raspodjela tlaka  $p_0$  iznosi :

$$p_0 = p_a - \rho g z \quad (2-1)$$

gdje je  $p_a$  atmosferski tlak, a  $g$  gravitacijsko ubrzanje. Višak tlaka zbog poremećaja je definiran kao:

$$p_e = p - p_0 \quad (2-2)$$

U odsustvu efekta viskoznosti, jednadžba kretanja (Eulerova jednadžba) za česticu fluida može se zapisati kao :

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\nabla p - g\mathbf{k} \quad (2-3)$$

Ovdje je  $D/Dt$  derivacija,  $\mathbf{u}(x,y,z)$  je vektor brzine i  $\mathbf{k}=\nabla z$  je vertikalna jedinica vektora. U jednadžbi (2-3)  $D\mathbf{u}/Dt$  je ubrzanje čestice tekućine,  $-\nabla p$  je resultantna sila tlaka po jedinici volumena i  $-g\mathbf{k}$  je gravitacijska sila po jedinici volumena. Kada uvrstimo jednadžbu (2-1) i (2-2), jednadžba (2-3) se može zapisati kao:

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\nabla p_e \quad (2-4)$$

Pomoću vektorskog računa i mehanike fluida  $D\mathbf{u}/Dt$  se može zapisati kao:

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} \equiv \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} \quad (2-5)$$

Sada slijedi linearna teorija, što podrazumijeva da će se uzeti u obzir tako mali poremećaji čiji produkti se u jednadžbama gibanja zanemaruju. U jednadžbi (2-5), linearni izraz  $\partial \mathbf{u}/\partial t$  predstavlja lokalnu razinu promjene od  $\mathbf{u}$  na fiksnoj točki, dok nelinearni izraz  $(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u}$  opisuje brzinu promjene elemenata uslijed promjene položaja u prostoru. Ova konvektivna stopa promjene od  $\mathbf{u}$  uključuje produkte njegovih prostornih gradijenata sa komponentama od  $\mathbf{u}$ , i zato je to zanemarivo u linearnoj teoriji. Tako da ostaje:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = -\nabla p_e \quad (2-6)$$

Sada se uvodi vektor vrtloženja  $\boldsymbol{\Omega} = \nabla \times \mathbf{u}$ , te će se uvesti rotacija (rot) sa obje strane jednadžbe (2-6). Budući da je  $\nabla \times (\nabla p_e) \equiv 0$ , dobije se:

$$\frac{\partial \Omega}{\partial t} = 0 \quad (2-7)$$

Ovo pokazuje da u linearnoj teoriji vrtložno polje je neovisno o vremenu: vrtloženje se ne mijenja, dok ostale veličine se mogu mijenjati. Rotacijski dio polja brzine, inducirano ovim stacionarnim vrtložnim poljem, je neovisan o vremenu, ima  $\nabla p_e = 0$  i  $p_e = 0$  (jednadžba (2-6)), i tako ne uznemirava ravnotežu vodene površine. Preostali dio polja brzine je nerotacijski i zato može biti zapisan kao gradijent  $\nabla \Phi$  od potencijala brzine  $\Phi(x,y,z)$ : samo ovaj dio uznemirava površinu vode ili je izložen fluktuacijama koje su povezane sa širenjem valova. Jednadžba kontinuiteta za nestišljivi fluid je  $\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$ , dajući za ovaj nerotirajući propagirajući dio polja brzine Laplace-ovu jednadžbu:

$$\nabla^2 \Phi = 0 \quad (2-8)$$

Rotirajući nepropagirajući dio polja brzine može postojati ako morska voda, preko koje se šire valovi, kreće horizontalno u struji smicanja gdje je vertikalna komponenta brzine 0, a horizontalne komponente su neovisne o vremenu i funkcije su samo vertikalne koordinate  $z$ . Ovdje se neće razmatrati situacije i slučajevi gdje se valovi šire preko mase vode uzrokovani strujama plime ili drugim tipovima morskih struja. Zato se ostaje sa nerotirajućim propagirajućim poljem brzine koje se izražava kao:

$$\mathbf{u} = \nabla \Phi \quad (2-9)$$

Jednadžba uznemirene vodene slobodne površine se zapisuje kao:

$$z = \zeta(x, y, t) \quad (2-10)$$

,tako je

$$p_e = \rho g \zeta \quad (2-11)$$

na uznemirenoj vodenoj površini, kako bi jednadžbe (2-1) i (2-2) omogućile tlaku  $p = p_0 + p_e$  da uzme atmosfersku vrijednost  $p_a$  na toj površini. Kombinirajući jednadžbe (2-6) i (2-9) dobit će se za višak tlačnog polja:

$$p_e = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (2-12)$$

Preko jednadžbi (2-10) i (2-11) se onda dobije:

$$\left[ \frac{\partial \Phi}{\partial t} \right]_{z=\zeta} = -g \zeta \quad (2-13)$$



i to govori da granični uvjet koji sadrži oblik  $z=\zeta$  na slobodnoj površini nije poznat unaprijed. U linearnoj teoriji, ovaj oblik nestaje i jednačba (2-9) se može zapisati kao:

$$\left[\frac{\partial\Phi}{\partial t}\right]_{z=0} = -g\zeta \quad (2-14)$$

zato što razlika između lijevih strana jednačbi (2-13) i (2-14) je jednaka produktu malog poremećaja  $\zeta$  slobodne površine i još jednog malog poremećaja: vrijednost druge derivacije  $\partial^2\zeta/\partial z\partial t$  u točki međuprostora između neuznemirene i uznemirene površine  $z=0$  i  $z=\zeta$ . Drugi granični uvjet povezuje nerotacijsko polje brzine  $\mathbf{u}$  sa vertikalnim premještanjem  $\zeta$  slobodne površine. Stopa promjene  $\zeta$  koja slijedi vodenu česticu slobodne površine (tj. udaljenost od ravnine  $z=0$ ) je jednaka vertikalnoj komponenti  $\partial\Phi/\partial z$  brzine  $\mathbf{u} = \nabla\Phi$  na površini:

$$\frac{D\zeta}{Dt} \equiv \frac{\partial\zeta}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla\zeta = \left[\frac{\partial\Phi}{\partial z}\right]_{z=\zeta} \quad (2-15)$$

U linearnoj teoriji, jednačba (2-15) može biti pojednostavljena. Prvo, na lijevoj strani zanemarivanjem konvektivne stope promjene  $\mathbf{u} \cdot \nabla\zeta$  kao produkta malih poremećaja, te drugo zamjenom vrijednosti  $z=\zeta$  na desnoj strani sa vrijednosti  $z=0$  kao u jednačbi (2-14). Ovo daje:

$$\frac{\partial\zeta}{\partial t} = \left[\frac{\partial\Phi}{\partial z}\right]_{z=0} \quad (2-16)$$

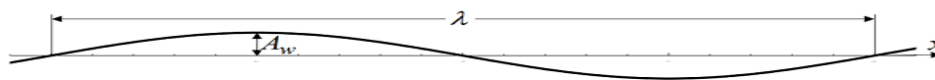
Jednačbe (2-14) i (2-16) su linearni granični uvjeti, za primjenu na fiksnom graničnom uvjetu  $z=0$  u području  $z\leq 0$  u kojem Laplace-ova jednačba (2-8) mora biti zadovoljena. Diferenciranjem jednačbe (2-14) u odnosu na  $t$ , eliminira se  $\zeta$  kako bi se dobilo:

$$\frac{\partial^2\zeta}{\partial t^2} = -g \frac{\partial\Phi}{\partial z}, \text{ na } z = 0 \quad (2-17)$$

kao granični uvjet za sami potencijal brzine  $\Phi$ . Rješenja jednačbe (2-8) u  $z\leq 0$ , ovisno o ovom graničnom uvjetu (2-17), predstavljaju površinske gravitacijske valove, pri čemu se površinski pomak može izvesti od potencijala brzine jednačbama (2-14) ili (2-16).

### 2.2.2. Sinusoidalni valovi na dubokoj vodi

Nakon saznanja da linearna teorija površinskih gravitacijskih valova zahtjeva samo rješenje poznate Laplace-ove jednačbe (2-8) za nerotacijski nestišljivi protok, ovisno o specijalnom graničnom uvjetu (2-17) na neuznemirenom položaju  $z=0$  slobodne površine, sljedeće što će se proučavati su rješenja koja opisuju putujuće sinusoidalne valove (Sl. 2.2.).



**Sl. 2.2.** Prikaz sinusoidalnih valova valne duljine  $\lambda$  i amplitude  $A_w$

Prvo se razmatra slučaj valova na vodi tako dubokoj da je granični uvjet automatski zadovoljen na dnu zato što gibanja povezana sa površinskim valovima ne mogu prodrijeti tako duboko. Površinski valovi pod ovim uvjetima su opisani kao valovi na dubokoj vodi. Kao što će se vidjeti, ovaj uvjet je zadovoljen sa dobrom aproksimacijom za bilo koju vodenu masu čija dubina svuda prelazi valnu duljinu.

Koristit će se matematički alati teorije kompleksne varijable. Tako je:

$$e^{i\omega t} = \cos \omega t + i \sin \omega t \quad (2-18)$$

i

$$\cos \omega t = \text{Re}(e^{i\omega t}), \sin \omega t = \text{Im}(e^{i\omega t}) \quad (2-19)$$

gdje  $\text{Re}()$  i  $\text{Im}()$  označavaju realni i imaginarni dio. U osnovi pišemo, za fizikalnu veličinu  $f(t)$  koja varira sinusoidalno sa vremenom :

$$f(t) = \text{Re}(F e^{i\omega t}) \quad (2-20)$$

gdje je,

$$F = F_0 e^{i\alpha} \quad (2-21)$$

kompleksna amplituda, i  $F_0 = |F|$  i  $\alpha$  su modul i argument od  $F$ . Možemo zapisati i:

$$f(t) = \text{Re}(F_0 e^{i(\omega t + \alpha)}) = F_0 \cos(\omega t + \alpha) \quad (2-22)$$

U onom što slijedi, u većini slučajeva će se izostaviti simbol  $\text{Re}()$ , što je razumljivo zato, kad god se fizikalna veličina izjednačava sa kompleksnim izrazom, mora se uzeti realni dio izraza. Može se lako potvrditi, da u dubokoj vodi, potencijal brzine koji predstavlja sinusni val koji se širi u pozitivnom  $x$ -smjeru s valnom brzinom  $c$  je:

$$\Phi = \Phi(z) \exp[i\omega(t - x/c)] = \Phi(z) \exp[i(\omega t - kx)] \quad (2-23)$$

gdje  $\omega$  (radijalna ili kutna frekvencija) i  $k$  (valni broj) zadovoljavaju jednadžbe:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}, k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2-24)$$

gdje je period  $T$  i valna duljina  $\lambda$ . Funkcija  $\lambda=cT$  predstavlja ovisnost amplitude gibanja na udaljenosti ( $-z$ ) ispod površine. Izraz (2-23) (gdje se podrazumijeva da realni dio predstavlja potencijal brzine) zadovoljava Laplace-ovu jednadžbu (2-8) ako  $\Phi(z)$  zadovoljava:

$$\Phi''(z) - k^2\Phi(z) = 0 \quad (2-25)$$

Osnovno rješenje ove obične diferencijalne jednadžbe je linearna kombinacija rješenja  $e^{kz}$  i drugog rješenja  $e^{-kz}$ ; prvo od ovih rješenja zadovoljava granični uvjet za duboku vodu, tako da gibanje koje predstavlja postaje manje i manje na položajima daleko ispod površine gdje je  $z$  velik i negativan; odnosno, na donjoj granici gdje  $z < -\lambda$ , pada na manje od  $e^{-2\pi} = 0,00187$  i postaje prilično zanemariva.

Za valove u dubokoj vodi zato se mora uzeti:

$$\Phi(z) = \Phi_0 e^{kz} \quad (2-26)$$

gdje je  $\Phi_0$  konstanta (vrijednost  $\Phi$  na  $z=0$ ). Mora se izbjegavati uključivanje bilo kojeg izraza koji je proporcionalan  $e^{-kz}$ , zato što bi to povećalo eksponencijalno gdje je  $z$  velik i negativan (prekoračenje  $e^{2\pi} = 535$  na položajima višim od valne duljine ispod površine). Očito, jednadžbe (2-23) i (2-26) impliciraju da  $\partial^2\Phi/\partial t^2$  je  $-\omega^2\Phi$ , dok  $\partial\Phi/\partial z$  je  $k\Phi$ , tako da granični uvjet (2-17) na  $z=0$  daje:

$$\omega^2 = gk \quad \text{ili} \quad T^2 = \frac{2\pi\lambda}{g} \quad (2-27)$$

kao vezu između frekvencije i valnog broja (ili između valnog perioda i valne duljine) za gravitacijske valove na dubokoj vodi. Ovaj disperzijski odnos se može također zapisati preko valne brzine  $c$ , preko (2-24), kao:

$$c = \frac{\omega}{k} = \left(\frac{g}{k}\right)^{1/2} = \left(\frac{g\lambda}{2\pi}\right)^{1/2} \quad (2-28)$$

Takva ovisnost valne brzine o korijenu valne duljine podrazumijeva vrlo značajne varijacije u rasponu valnih duljina  $\lambda$ . Za raspone tipičnih valova sa valnim duljinama između 30 m i 300 m, valna brzina  $c$  varira od 6,8 m/s do 21,6 m/s i period  $T$  od 4,4 s do 13,9 s. Jednadžbe (2-23) i (2-26) daju za komponente brzine u  $x$ -smjeru (horizontalni) i  $z$ -smjeru (vertikalni) vrijednosti:

$$\frac{\partial\Phi}{\partial x} = -ik\Phi_0 e^{kz} \exp[i(\omega t - kx)], \quad \frac{\partial\Phi}{\partial z} = -k\Phi_0 e^{kz} \exp[i(\omega t - kx)] \quad (2-29)$$

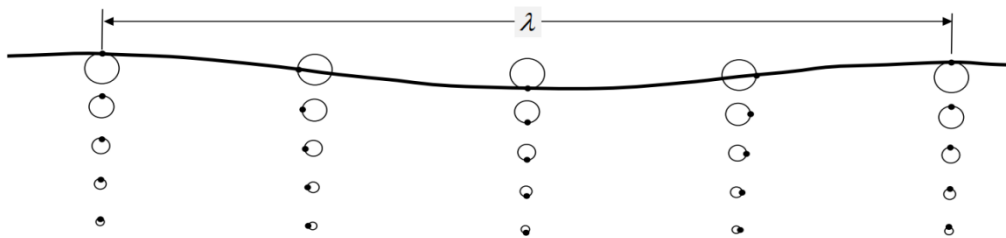
koje variraju sinusoidalno sa vremenom sa istom amplitudom  $k\Phi_0 e^{kz}$ . Amplituda naravno ovisi o položaju: smanjuje se eksponencijalno sa udaljenošću ispod površine. Na bilo kojem fiksnom položaju, oscilirajuće komponente brzine (2-29) razlikuju se samo u fazama; kod horizontalne komponente  $\partial\Phi/\partial x$  zaostaje za  $90^\circ$  (predstavljena sa  $-i$  faktorom) za vertikalnom komponentom  $\partial\Phi/\partial z$ . To znači da vektor brzine rotira u smjeru kazaljke na satu, sadržavajući uvijek istu veličinu  $k\Phi_0 e^{kz}$ , dok njegova horizontalna i vertikalna komponenta osciliraju. Linearna teorija sinusoidalnih valova na dubokoj vodi, predviđa da na bilo kojem fiksnom položaju, brzina fluida ostaje konstantna, dok smjer kretanja fluida rotira kutnom brzinom  $\omega$ . Brzina čestice fluida, koja može pretrpjeti mala oscilirajuća premještanja sa fiksnog položaja, može se smatrati da zadovoljava isti taj zakon, budući da u linearnoj teoriji razlika između malih brzina koje se nalaze na fiksnom položaju i onih koje su malo pomaknute iz fiksnog položaja, može biti zanemarena kao produkt malih iznosa. Tako, čestica fluida koja se valovima pomakne iz položaja  $(x,y,z)$ , se kreće konstantnom brzinom  $k\Phi_0 e^{kz}$  i smjerom vrtnje sa kutnom brzinom  $\omega$ ; drugim riječima, opisuje krug promjera:

$$\omega^{-1}k\Phi_0 e^{kz} \quad (2-30)$$

Amplituda vala  $A_W$  je jednaka maksimalnoj vrijednosti elevacije  $\zeta(x,t)$  i dana je jednačbom (2-30) sa  $z=0$ , tj.

$$A_W = \omega^{-1}k\Phi_0 \quad (2-31)$$

Iz ovog se zaključuje da je faza kretanja (2-28) neovisna o  $z$ , budući da je faktor  $e^{kz}$  svuda realan i pozitivan. Prema tome, u bilo kojoj vertikalnoj ravnini  $x=const.$  ta kretanja uzrokuju da sve čestice fluida rotiraju u fazi. Iako sa radijusom ovisnim kao u (2-30) na udaljenosti  $-z$  ispod površine, dok se naravno  $x$  povećava, faza kretanja se smanjuje na razinu  $k = 2\pi/\lambda$ . Slika 2.3. ilustrira ovu aproksimaciju linearne teorije na gibanje čestica fluida u sinusoidalnim valovima na dubokoj vodi.



**Sl 2.3.** *Gibanje čestica fluida u sinusoidalnim valovima valne duljine  $\lambda$  s lijeva na desno u dubokoj vodi*

### 2.2.3. Sinusoidalni valovi na vodi proizvoljne, ali jednolike dubine

Sada, umjesto pretpostavke da su valovi na dubokoj vodi (u smislu da njegova dubina svugdje prelazi valnu duljinu  $\lambda$ ), uzet će se u obzir i valovi na vodi jednolike dubine  $h$ . Na čvrstom dnu  $z=-h$ , granični uvjet nulte normalne brzine je

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0, \quad \text{na } z = -h \quad (2-32)$$

te je prikladan za nerotacijski protok. Ovaj granični uvjet (2-32) mijenja izračun u odlomku 2.2.1. samo određivanjem drugačije traženog rješenja obične diferencijalne jednadžbe (2-26) za amplitudu  $\Phi(z)$  općeg izraza (2-23) za sinusoidalne valove. Umjesto određivanja rješenja (2-25) koje postaje nula kada  $z$  postane velik i negativan, određuje se rješenje zadovoljavajući  $\Phi'(-h) = 0$ . To znači da u općoj linearnoj kombinaciji osnovnih rješenja (2-25),

$$\Phi_1 e^{kz} + \Phi_2 e^{-kz} \quad (2-33)$$

$$\Phi_1 e^{-kh} = \Phi_2 e^{kh} \quad (2-34)$$

i izjednačavajući obje strane jednadžbe (2-34) sa  $\frac{1}{2} \Phi_0$ , može se zapisati rješenje kao:

$$\Phi(z) = \Phi_0 \cosh[k(z + h)] \quad (2-35)$$

Ovdje i drugdje koristit će se klasična notacija

$$\cosh x = \frac{1}{2}(e^x + e^{-x}) \quad (2-36)$$

$$\sinh x = \frac{d \cosh x}{dx} = \frac{1}{2}(e^x - e^{-x}) = \cosh x \tanh x \quad (2-37)$$

za hiperbolne funkcije.

Dok jednačba (2-23) zahtijeva da  $\partial^2 \Phi / \partial t^2$  je  $-\omega^2 \Phi$ , to podrazumijeva sa jednačbom (2-33) da na  $z=0$ :

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = \frac{\Phi'(0)}{\Phi(0)} \Phi = (k \tanh kh) \Phi \quad (2-38)$$

tako da granični uvjet slobodne površine (2-17) donosi:

$$\omega^2 = gk \tanh kh \quad (2-39)$$

kao odnos između frekvencije  $\omega$  i valnog broja  $k$  za gravitacijske valove na vodi proizvoljne, ali jednolike dubine  $h$ . Ovaj disperzijski odnos može biti zapisan i preko valne brzine  $c$  kao

$$c = \frac{\omega}{k} = (gk^{-1} \tanh kh)^{1/2} \quad (2-40)$$

U ograničavajućoj situaciji duboke vode,  $kh$  je velik,  $\tanh kh \rightarrow 1$  i izraz za valnu brzinu  $c$  postaje identičan izrazu (2-28). Ostale ograničavajuće situacije javljaju se kada je  $kh$  malen (granica dugog vala ili plitke vode): u ovom slučaju  $\tanh kh$  asimptotira u  $kh$  i jednačba (2-40) postaje:

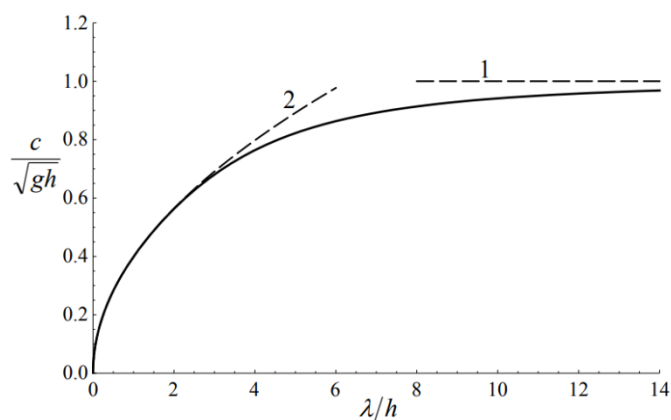
$$c = (gh)^{1/2}, \text{ za } kh \ll 1 \quad (2-41)$$

Stoga, u granici dugih valova ili plitke vode, valna brzina  $c$  postaje neovisna o frekvenciji  $\omega$  i ovisi samo o dubini vode  $h$ .

Jednačba (2-40) može također biti zapisana kao:

$$c = \left[ \frac{g\lambda}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{\lambda} \right]^{1/2} \quad (2-42)$$

što očitije pokazuje ovisnost  $c$  o omjeru  $\lambda/h$ . To je samo u rasponu dubina  $h$  između  $0,07\lambda$  i  $0,28\lambda$  (odgovara valnim duljinama  $\lambda$  između  $14h$  i  $3,5h$ ) da  $c$ , kao što je dano jednačbom (2-42), značajno odstupa od oba ograničavajuća oblika. Slika 2.4. prikazuje ovo crtajući  $c$  u ovisnosti o  $\lambda$  za fiksni  $h$  prema jednačbi (42) i pokazuje kako ona čini glatki prijelaz između paraboličnog graničnog oblika  $(g\lambda/2\pi)^{1/2}$  za  $\lambda < 3,5h$  i konstantne asimptote  $(gh)^{1/2}$  za  $\lambda > 14h$ .



**SI 2.4.** Valna brzina  $c$  u ovisnosti o  $\lambda$  na vodi jednolike dubine  $h$

Primjer:  $T=8$  s,  $g=9,8$  m/s<sup>2</sup>

- Duboka voda

$$c = \frac{gT}{2\pi} = \frac{9,8 \times 8}{2\pi} = 12,5 \text{ m/s}$$

$$\lambda = cT = 12,5 \times 8 = 100 \text{ m}$$

- Plitka voda  $h=1$  m

$$c = \sqrt{gH} = \sqrt{9,8 \times 1} = 3,1 \text{ m/s}$$

$$\lambda = cT = 3,1 \times 8 = 25 \text{ m/s}$$

- Srednja dubina vode  $h=15$  m

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{8} = 0,785 \text{ rad/s}$$

$$c = \frac{\omega}{g} = \tanh \frac{\omega h}{c} \quad c \times \frac{0,785}{9,8} = \tanh \frac{0,785 \times 15}{c} \quad c = 10,2 \text{ m/s}$$

$$\lambda = cT = 10,2 \times 8 = 81,8$$

**Tab. 2.1.** Tablični prikaz ovisnosti  $c$  o  $\lambda$  na vodi jednolike dubine  $h$

| $h(\text{m})$ | $c(\text{m/s})$ | $\lambda(\text{m})$ |
|---------------|-----------------|---------------------|
| 1             | 3,10            | 24,8                |
| 3             | 5,25            | 42,0                |
| 5             | 6,63            | 53,0                |
| 10            | 8,86            | 70,9                |
| 15            | 10,22           | 81,8                |
| 20            | 11,09           | 88,7                |
| 25            | 11,65           | 93,2                |
| 30            | 12,00           | 96,0                |
| 40            | 12,33           | 98,6                |
| 50            | 12,44           | 99,5                |
| $\infty$      | 12,48           | 99,8                |

Jednadžbe (2-24) i (2-35) daju za komponente brzine u horizontalnom i vertikalnom smjeru vrijednosti:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x} = -i\{k\Phi_0 \cosh[k(z+h)]\}\exp[i(\omega t - kx)], \quad (2-43)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = \{k\Phi_0 \sinh[k(z+h)]\}\exp[i(\omega t - kx)], \quad (2-44)$$

pokazujući različite amplitude sinusoidalne varijacije, predstavljene izrazom u kovrčavim zagradama. Doista, vrijednosti  $\cosh[k(z+h)]$  i  $\sinh[k(z+h)]$  postaju bliske jedna drugoj samo gdje je  $k(z+h)$  veliko tj. u granici duboke vode ( $kh$  velik).

Na bilo kojem fiksnom položaju, baš kao i za valove u dubokoj vodi, oscilacije komponenti brzina (2-43) i (2-44) razlikuju se za  $90^\circ$  u fazi: tako da horizontalna komponenta  $\partial\Phi/\partial x$  kasni  $90^\circ$  (predstavljena  $-i$  faktorom) za vertikalnom komponentom  $\partial\Phi/\partial z$ . U linearnoj teoriji isti izrazi (2-43) i (2-44) opisuju komponente brzine od čestice fluida koja može pretrpjeti malo oscilirajuće premještanje sa fiksnog položaja. Iz ovog možemo zaključiti, kao i u odlomku 2.2.1., ako su obje amplitude brzine  $k\Phi_0 \cosh[k(z+h)]$ , onda čestica mora opisati krug promjera  $\omega^{-1}k\Phi_0 \cosh[k(z+h)]$ ; međutim, stvarno gibanje, sa amplitudom vertikalnih brzina smanjenom faktorom  $\tanh[k(z+h)]$ , prati kružni put skraććen u vertikalnom smjeru upravo tim faktorom; drugim riječima, elipsa sa glavnim i sporednim poluosima:

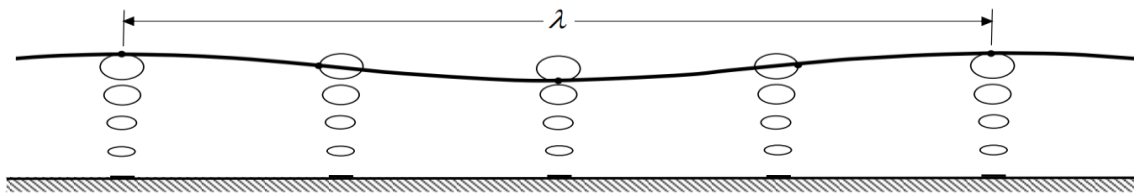
$$\omega^{-1}k\Phi_0 \cosh[k(z+h)] \quad i \quad \omega^{-1}k\Phi_0 \sinh[k(z+h)] \quad (2-45)$$

Amplituda vala  $A_w$  (maksimalna vrijednost površinske elevacije  $\zeta$ ) je dana sa sporednom poluosu na  $z=0$ ,



$$A_w = \omega^{-1} k \Phi_0 \sinh kh \quad (2-46)$$

Slika 2.5. ilustrira ovu aproksimaciju linearne teorije gibanja čestica fluida u valovima duljine  $\lambda$  na vodi posebne dubine  $h=0,16\lambda$ , u sredini između vrijednosti  $0,07\lambda$  i  $0,28\lambda$  gdje granice dugih valova i duboke vode daju razumnu aproksimaciju.



**Sl. 2.5.** Čestice fluida u sinusoidalnom valu duljine  $\lambda$  koje putuju s lijeva na desno na vodi dubine  $h=0,16\lambda$

#### 2.2.4. Energija vala i valni energetski fluks

U površinskim valovima, mogu se razmatrati dva oblika energije: 1. kinetička energija i 2. energija povezana sa obnavljajućom silom, što je za gravitacijske valove gravitacijska potencijalna energija ( $\rho g z$ ) po jedinici volumena. Odgovarajuća vrijednost potencijalne energije po jedinici horizontalne površine, u točki gdje je dubina vode  $h$ , je dobivena integriranjem  $\rho g z dz$  od dna  $z=-h$  do slobodne površine  $z=\zeta$ , dajući:

$$\int_{-h}^{\zeta} \rho g z dz = \frac{1}{2} \rho g (\zeta^2 - h^2) \quad (2-47)$$

Tako je višak potencijalne energije po jedinici horizontalne površine iznad vrijednosti za neometanu slobodnu površinu ( $\zeta=0$ ):

$$\frac{1}{2} \rho g \zeta^2 \quad (2-48)$$

proporcionalan kvadratu premještanja sa pozicije ravnoteže. Kada povećana slobodna površina dodaje potencijalnu energiju umetanjem nove tekućine iznad položaja  $z=0$  (tj. sa pozitivnom potencijalnom energijom), smanjena slobodna površina dodaje potencijalnu energiju

uklanjanjem tekućine ispod razine  $z=0$  (tj. sa negativnom potencijalnom energijom). U sinusoidalnim valovima, visina površine može biti zapisana kao:  $\zeta(x,t)=A_w \cos(\omega t - kx + \alpha)$ , gdje je  $A_w$  amplituda vala i  $\alpha$  fazna konstanta. Vrijednost prosječne vrijednosti od  $\zeta^2$  je  $A_w^2/2$  i tako je vrijednost prosječne vrijednosti potencijalne energije po jedinici horizontalne površine:

$$\bar{E}_{potencijalna} = \frac{1}{4} \rho g A_w^2 \quad (2-49)$$

Kinetička energija po jedinici volumena je:  $\frac{1}{2} \rho |u|^2 = \frac{1}{2} \rho |\nabla \Phi|^2 = \frac{1}{2} \rho (\nabla \Phi * \nabla \Phi)$ . Uvrštavanjem u jednadžbu  $\nabla^2 \Phi = 0$  (2-8), pomoću vektorskog računa dobit ćemo:

$$|\nabla \Phi|^2 = \nabla * (\Phi \nabla \Phi) \quad (2-50)$$

Kinetička energija u masi vode volumena  $V$  zatvorena površinom  $S$  se može zapisati kao:

$$\frac{1}{2} \rho \int_V |\nabla \Phi|^2 dV = \frac{1}{2} \rho \int_V \nabla * (\Phi \nabla \Phi) dV \quad (2-51)$$

Ovaj volumni integral se može transformirati u površinski integral pomoću Gauss-ovog teorema divergencije i dobije se:

$$\frac{1}{2} \rho \int_V |\nabla \Phi|^2 dV = \frac{1}{2} \rho \int_S \Phi \frac{\partial \Phi}{\partial n} dS \quad (2-52)$$

Tu nema doprinosa površinskom integralu sa dna, gdje je  $\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0$ , i doprinos sa slobodne površine može u linearnoj teoriji biti aproksimirana sa istim integralom iznad neuznemirene slobodne površine  $z=0$ . Ovo daje, sa greškom prikladnoj linearnoj teoriji, kinetičku energiju:

$$\frac{\rho}{2} \left( \Phi \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right)_{z=0} \quad (2-53)$$

po jedinici horizontalne površine. Iz rezultata iznad, prosječna vrijednost izraza se može zapisati kao :

$$\bar{E}_{kinetička} = \frac{1}{4} \rho g A_w^2 \quad (2-54)$$

Jednadžbe (2-49) i (2-54) pokazuju da je  $\bar{E}_{potencijalna} = \bar{E}_{kinetička}$ . Ukupna prosječna inducirana energija valova po jedinici horizontalne površine je:

$$\bar{E} = \bar{E}_{potencijalna} + \bar{E}_{kinetička} = \frac{1}{2} \rho g A_w^2 \quad (2-55)$$

Ova jednadžba je ispravna za duboku vodu kao i za vodu proizvoljne, ali jednolike dubine. Kako valovi putuju duž površine oceana, tako oni nose svoju potencijalnu i kinetičku energiju.

Trenutne vrijednosti energetskog fluksa, duž vertikalnu ravninu  $x=const.$ , po jedinici vremena i po jedinici dužine valnog brijega (mjereno duž  $y$ -osi) iznose:

$$P_{potencijalna} = \int_{-h}^{\zeta} (\rho g z) \frac{\partial \Phi}{\partial x} dz \quad (2-56)$$

$$P_{kinetička} = \int_{-h}^{\zeta} \left( \frac{1}{2} \rho |\nabla \Phi|^2 \right) \frac{\partial \Phi}{\partial x} dz \quad (2-57)$$

za transportiranu potencijalnu i kinetičku energiju.

Pored ovog prijenosa potencijalne i kinetičke energije, energija se prenosi radom koji se vrši pritiskom u smjeru širenja valova. Ovaj rad koji se vrši po jedinici vremena i po jedinici dužine valnog brijega je jednak tlaku  $p_e - \rho g z$  pomnoženim sa komponentom horizontalne brzine  $\partial \Phi / \partial x$ , integriran od dna do površine i zapisuje se kao:

$$P_{tlaka} = \int_{-h}^{\zeta} (p_e - \rho g z) \frac{\partial \Phi}{\partial x} dz \quad (2-58)$$

U ovoj jednadžbi,  $p_e$  je višak tlaka povezan sa površinskom elevacijom  $\zeta$  iz formule (2-12):

$p_e = -p_0 \frac{\partial \Phi}{\partial t}$ . Ukupni energetski fluks  $P_{vala} = P_{potencijalna} + P_{kinetička} + P_{tlaka}$  je:

$$P_{vala} = \int_{-h}^{\zeta} \left( \frac{1}{2} \rho |\nabla \Phi|^2 \right) \frac{\partial \Phi}{\partial x} dz + \int_{-h}^{\zeta} p_e \frac{\partial \Phi}{\partial x} dz \quad (2-59)$$

Prvi integral sa desne strane jednadžbe (2-59) sadrži male količine poremećaja kubnog reda i može se zanemariti. Drugi integral se može zapisati kao:

$$-p_0 \int_{-h}^{\zeta} \frac{\partial \Phi}{\partial t} \frac{\partial \Phi}{\partial x} dz \quad (2-60)$$

Prosječna vrijednost energetskog fluksa se sada može lagano naći i iznosi:

$$\bar{P}_{vala} = \bar{E} c_g \quad (2-61)$$

gdje je  $\bar{E}$  prosječna vrijednost energije po jedinici površine po jednadžbi (2-48) i

$$c_g = \frac{1}{2} \frac{\omega}{k} \left( 1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \quad (2-62)$$

se naziva grupna brzina. Uzimajući u obzir izraz (2-40) o valnoj brzini  $c$ , grupna brzina može biti povezana sa  $c$  preko jednadžbe:

$$c_g = c \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \quad (2-63)$$

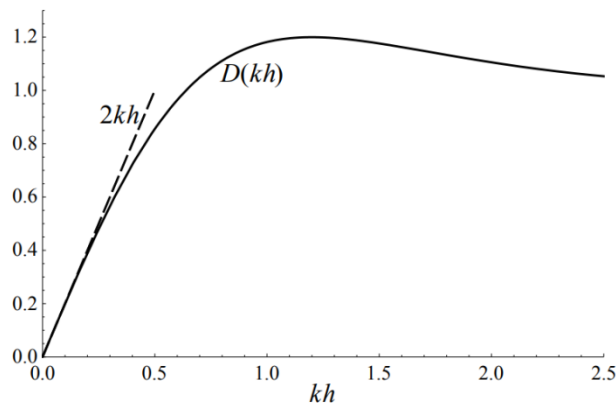
Također se može zapisati kao:

$$c_g = \frac{g}{2\omega} D(kh) \quad (2-64)$$

gdje je:

$$\begin{aligned} D(kh) &= \left[ 1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right] \tanh kh = \tanh kh + \frac{kh}{\cosh^2 kh} \\ &= \tanh kh + kh - k \tanh^2 kh = \left[ 1 - \left( \frac{\omega^2}{gk} \right)^2 \right] kh + \frac{\omega^2}{gk} \end{aligned} \quad (2-65)$$

Granične vrijednosti su  $D(kh) \rightarrow 1$  i  $kh \rightarrow \infty$  (granice za duboku vodu) i  $D(kh) \rightarrow 2kh$  i  $kh \rightarrow 0$  (granice za plitku vodu). Funkcija  $D(kh)$  je prikazana na slici 2.6..



**Sl. 2.6.** Grafički prikaz funkcije  $D(kh)$

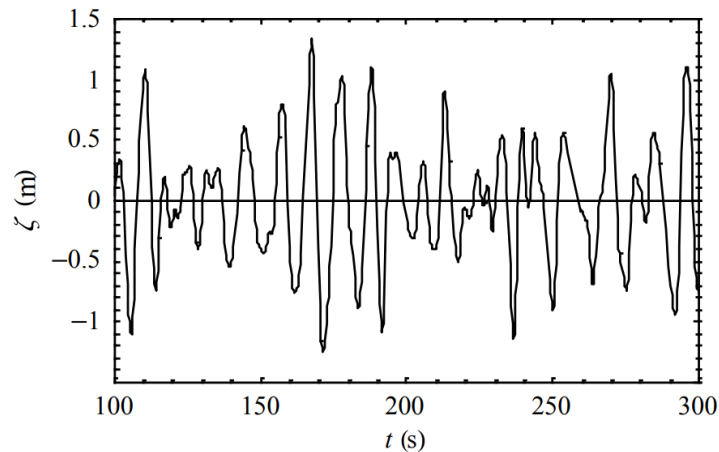
Grupna brzina može se smatrati kao brzina na kojoj se energija valova širi u smjeru okomitom valnom brijegu. Jednadžba (2-63) prikazuje da je  $c_g/c \leq 1$ . U granici dugačkih valova ili plitkih voda je  $kh \ll 1$ ,  $\sinh 2kh \cong 2kh$  i onda je  $c_g \cong c$ , tj. grupna brzina se podudara sa valnom brzinom. Kod granice za duboke vode,  $\sinh 2kh \gg 2kh$  i  $c_g \cong \frac{1}{2}c$ .

### 2.2.5. Nepravilni valovi<sup>2</sup>

Zasad smo razmotrili samo sinusoidalne ili pravilne valove. Stvarni oceanski valovi nisu

<sup>2</sup> odlomci od 2.2.5. do 2.2.7. se baziraju na [2]

pravilni: oni su nepravilni i uglavnom slučajni. Slika 2.7. predstavlja tipično stanje površinske elevacije mora  $\zeta$  na određenoj lokaciji kao funkciju vremena. To može biti registar iz mjerne plutače ili nekog drugog instrumenta.



**Sl. 2.7.** *Površinska elevacija mora na jednoj lokaciji kao funkcija vremena, mjerena plutačom*

Svrha opisivanja oceanskih valova sa spektrom nije da opiše u detalje jedno zapažanje površine mora (kao sl. 2.7.), nego više da opiše površinu mora kao stohastički proces, tj. da okarakterizira sva moguća zapažanja koja mogu biti napravljena pod uvjetima aktualnih zapažanja. Promatranje se formalno tretira kao jedna realizacija stohastičkog procesa. Uzima se u obzir valni zapis kao na slici 2.7., sa trajanjem  $D$ . Može se točno reproducirati taj zapis kao suma velikog (teorijski beskonačnog) broja harmonijskih valnih komponenti (Fourier-ov red):

$$\zeta(t) = \sum_{i=1}^N a_i \cos(2\pi f_i t + \alpha_i) \quad (2-66)$$

gdje su  $a_i$  i  $\alpha_i$  amplituda i faza svake frekvencije  $f_i=i/D$  ( $i=1,2,3,\dots$ ; interval frekvencije je stoga  $\Delta f=1/D$ ). Sa Fourier-ovom analizom, može se odrediti vrijednosti amplitude i faze za svaku frekvenciju i to će dati amplitudni i fazni spektar za ovaj zapis. Zamjenom tih izračunatih amplituda i faza u jednadžbu (2-66), može se točno reproducirati zapis (ako je  $N$  dovoljno veliko). Za većinu valnih zapisa, ispada da faze imaju bilo koju vrijednost između 0 i  $2\pi$  bez ikakve prednosti za bilo koju vrijednost. Budući da je ovo skoro uvijek slučaj u dubokim vodama (ne za veoma strme valove), zanemarit će se fazni spektar. Tada, samo amplitudni spektar ostaje da okarakterizira valni zapis. Ako bi se ponavljao eksperiment tj. mjerila površinska elevacija

pod statistički identičnim uvjetima, vremenski zapis bi bio drugačiji pa tako i amplitudni spektar. Da bi se uklonio karakterni uzorak spektra, mora se ponavljati eksperiment mnogo puta ( $M$ ) i uzeti prosjek svih eksperimenata, i tako dobiti prosječni amplitudni spektar:

$$\bar{a}_i = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M a_{i,m} \quad (2-67)$$

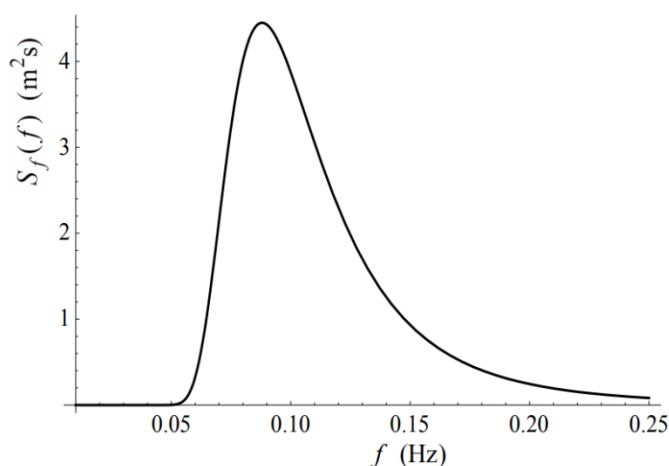
za sve frekvencije  $f_i$ , gdje je  $a_{i,m}$  vrijednost od  $a_i$  u eksperimentu sa rednim brojem  $m$ . Za velike vrijednosti  $M$ , vrijednost od  $a_i$  konvergira (približava se konstantnoj vrijednosti dok se povećava  $M$ ) tako da rješava problem uzorkovanja. Međutim, smisleno je distribuirati varijancu svake komponente valova  $\frac{1}{2} \bar{a}_i^2$ . Važan razlog je taj što je energija valova proporcionalna kvadratu amplitude vala (ne amplitude) (2-55)).

Spektar varijance  $\frac{1}{2} \bar{a}_i^2$  je diskretan, tj., samo su frekvencije  $f_i=i/D$  prisutne, dok su zapravo sve frekvencije prisutne u moru. To se rješava tako da se frekvencijski interval približi nuli.

Definicija spektra gustoće varijance tako postaje:

$$S_f(f) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta f} \frac{1}{2} \bar{a}_i^2 \quad (2-68)$$

Dimenzije i SI jedinice gustoće varijance  $S_f(f)$  slijede izravno iz jednadžbe (2-68) i jesu  $[L^2T]$  i  $[m^2s]$  ili  $[m^2/Hz]$ . Slika 2.8. prikazuje tipični spektar gustoće varijance.



**SI 2.8.** *Spektar gustoće varijance*

Spektar gustoće varijance daje kompletan opis površinske elevacije oceanskih valova u statističkom smislu, pokazujući da površinska elevacija se može promatrati kao stacionaran Gauss-ov proces. Za korištenje ovog pristupa za uvjete na moru, koji u stvari nisu nikad stacionarni, valni zapis treba biti podijeljen u segmente, koji se smatraju približno stacionarnim (obično se koristi trajanje od 30 minuta). Osim toga, na moru komponente valova nisu stvarno nezavisne jedna od druge, one međusobno djeluju u određenom stupnju. Međutim, ako valovi nisu previše strmi i nisu u veoma plitkim vodama, ove interakcije su slabe i mogu se zanemariti. Površinska elevacija mora je slučajna funkcija vremena. Njegova ukupna varijanca je:

$$\bar{\zeta}^2 = \int_0^{\infty} S_f(f) df \quad (2-69)$$

Spektar gustoće varijance  $S_f(f)$ , prikazuje kako je varijanca površinske elevacije mora podijeljena na frekvencije. Jednadžba (2-55) kaže da je ukupna prosječna (potencijalna + kinetička energija) valova po jedinici horizontalne površine  $\bar{E} = \frac{1}{2} \rho g A_w^2$ . Ako se pomnoži  $S_f(f)$  sa  $\rho g$  dobije se spektar gustoće energije:

$$E_f(f) = \rho g S_f(f) = \frac{1}{2} \rho g \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta f} \bar{a}_i^2 \quad (2-70)$$

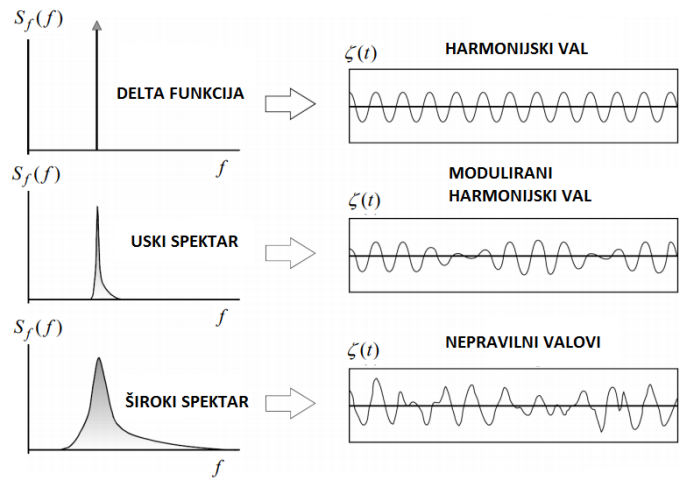
Gustoća varijance  $S_f(f)$  je definirana iznad frekvencije  $f=1/T$  (gdje je  $T$  period harmonijskih valova), ali može jednako biti formulirana kao  $S_\omega(\omega)$  preko radijalne frekvencije  $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$ . Iz jednadžbe (2-68) može se zapisati:

$$\bar{\zeta}^2 = \int_0^{\infty} S_f(f) df = \int_0^{\infty} S_\omega(\omega) d\omega \quad (2-71)$$

Kako je  $d\omega = 2\pi df$ , dobije se:

$$S_\omega(\omega) = \frac{1}{2\pi} S_f(f) \quad (2-72)$$

Ukupni izgled valova se može zaključiti iz oblika spektra: što je spektar uži, valovi su pravilniji. Ovo je prikazano za tri različita uvjeta vala na slici 2.9.. Najужи spektar odgovara harmonijskom valu (pravilni val sa jednom frekvencijom): spektar tada degenerira do delta funkcije na jednoj frekvenciji. Raspodjela varijance preko malo šireg frekvencijskog pojasa daje polagano modulirani harmonijski val zato što komponente se uključe samo malo u frekvencije i stoga polako izlaze jedni s drugima, stvarajući tako prilično pravilno valno polje. Raspodjela varijance vala preko šireg frekvencijskog pojasa daje kaotično valno polje (nepravilni valovi), jer komponente u vremenu brzo izlaze iz faze jedna s drugom.



Sl. 2.9. Nepravilni oblici valova za tri različite širine spektra

### 2.2.6. Značajna visina vala, srednje vrijeme vala

Kada je slučajna morska površinska elevacija razmatrana kao stacionarni, Gauss-ov proces, onda sve statističke karakteristike su određene spektrom gustoće varijance  $S_f(f)$ . Ove karakteristike će biti izražene u preko trenutaka spektra, koji su definirani kao:

$$m_n = \int_0^{\infty} f^n S_f(f) df \quad (m = \dots, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (2-73)$$

Trenutak  $m$  se naziva  $m$ -ti trenutak od  $S_f(f)$ . Npr. varijanca od površinske elevacije je jednaka nultom trenutku.

$$\bar{\zeta}^2 = \int_0^{\infty} S_f(f) df = m_0 \quad (2-74)$$

Značajna visina vala, označena sa  $H_s$ , je definirana kao srednja vrijednost najviše jedne trećine valnih visina u valnom zapisu. Približno je dana izrazom:

$$H_s \cong H_{m0} = 4\sqrt{m_0} \quad (2-75)$$

U studijama pretvorbe energije valova, najčešće se koriste dvije različite definicije srednjeg perioda za nepravilne valove. Jedna je vršni period  $T_p = 1/f_p$ , gdje je  $f_p$  vrijednost (vršna frekvencija) frekvencije  $f$  za koju je gustoća varijance  $S_f(f)$  maksimalna ( $f_p$  je apscisa vrha krivulje na slici 2.8.). Druga definicija je energetska period  $T_e$ :



$$T_e = \frac{m_{-1}}{m_0} \quad (2-76)$$

Ako je funkcija  $S_f(f)$  poznata za dano morsko stanje, onda se srednji periodi  $T_p$  i  $T_e$  mogu lako izračunati i međusobno povezivati.

### 2.2.7. Energetski fluks

Podsjećamo da je ukupna (potencijalna plus kinetička) prosječna energija pravilnog vala amplitude  $A_w$ , po jedinici horizontalne površine (jed. (2-55)):  $\bar{E} = \frac{1}{2}\rho g A_w^2$ . Odgovarajući prosječni energetski fluks po jedinici dužine valnog brijega je (jed. (2-61)):  $\bar{P}_{vala} = \bar{E}c_g$ , gdje je  $c_g$  grupna brzina. U dubokim vodama:  $c_g = \frac{1}{2}c = g/(4\pi f)$ . Za nepravilne valove sa spektrom gustoće varijance  $S_f(f)$ , energetski fluks, koji se transportira valovima u duboku vodu, unutar frekvencijskog intervala  $(f, f+df)$ , je (jed. (2-69)):

$$d\bar{P}_{vala} = c_g E_f(f) df = \rho g c_g S_f(f) df = \frac{\rho g^2}{4\pi} S_f(f) \frac{1}{f} df \quad (2-77)$$

Integriranjem, dobije se:

$$\bar{P}_{vala} = \frac{\rho g^2}{4\pi} \int_0^\infty S_f(f) \frac{1}{f} df = \frac{\rho g^2}{4\pi} m_{-1} \quad (2-78)$$

gdje je  $m_{-1}$  spektralni trenutak reda -1. Kako je  $T_e = m_{-1}/m_0$  i  $H_s = 4\sqrt{m_0}$ , dobije se, za nepravilne valove u dubokoj vodi,

$$\bar{P}_{vala} = \frac{\rho g^2}{64\pi} H_s^2 T_e \quad (2-79)$$

Ako uzmemo u obzir da je  $g=9,8 \text{ m/s}^2$  i  $\rho=1025 \text{ kg/m}^3$ , dobije se:

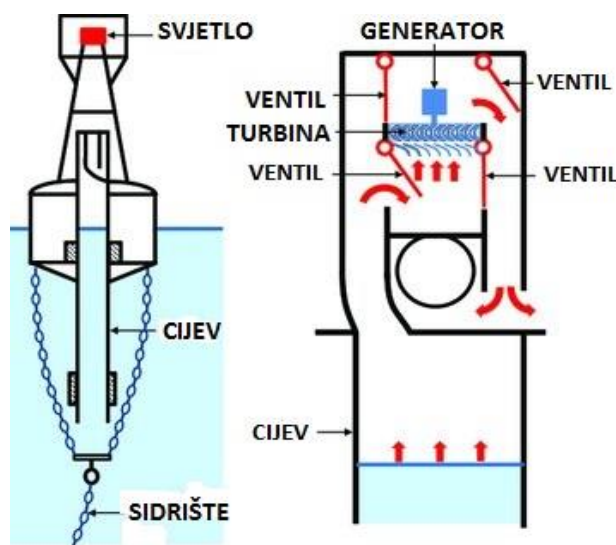
$$\bar{P}_{vala} = 0,49 H_s^2 T_e \quad (2-80)$$

sa  $\bar{P}_{vala}$  u (kW/h),  $H_s$  u (m) i  $T_e$  u (s). Jednadžbe (2-78) i (2-79) pokazuju prednost korištenja energetskog perioda  $T_e$  kod nepravilnih valova: ove jednadžbe vrijede za sve spektre gustoće varijance  $S_f(f)$ . (ili  $S_\omega(\omega)$ ).

### 3. TEHNOLOGIJE ZA ISKORIŠTAVANJE ENERGIJE VALOVA

#### 3.1. Povijest korištenja energije valova

Energija valova spada u obnovljive izvore energije, i ovu energiju uzrokuje najvećim dijelom djelovanje vjetrova na površinu mora ili oceana. Dnevne mijene plime i oseke kao i stalne cirkulacije oceanskih struja utječu na snagu valova. Za korištenje energije valova potrebno je odabrati lokaciju na kojoj su valovi dovoljno česti i dovoljne snage. Mogućnost pretvorbe energije valova u korisnu energiju je inspirirala mnoge izumitelje, više od tisuću patenata je bilo registrirano do 1980. godine [3], a broj je značajno porastao od tada. Najraniji patent je iz 1799. godine, a pripada ocu i sinu iz Francuske [4]. Yoshio Masuda, bivši japanski pomorski oficir, se može smatrati ocem modernih tehnologija za iskorištavanje energije valova, sa svojim istraživanjima u Japanu od 1940-ih godina. Na slici 3.1. je prikazana plutača, koju je on razvio, napajana energijom valova, opremljena sa zračnom turbinom, što je ustvari kasnije nazvano oscilirajući vodeni stupac (eng. *oscillating water column-OWC*) [5].



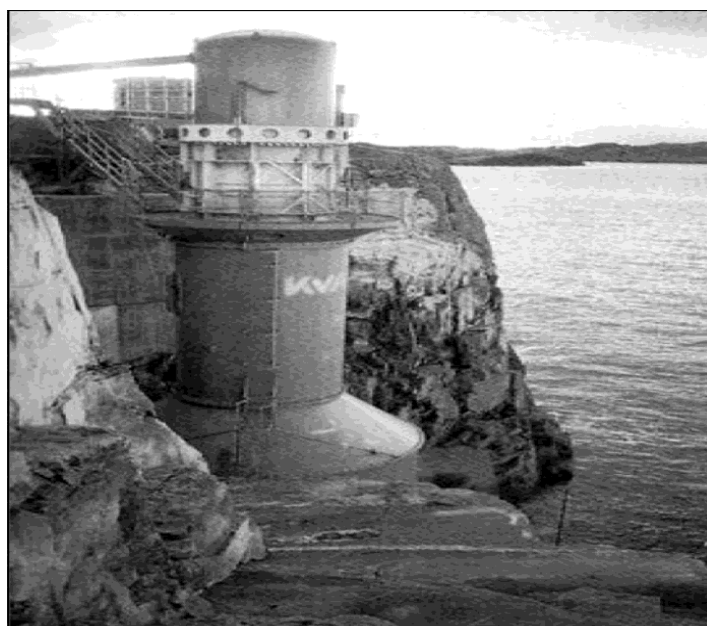
Sl. 3.1. Shema plutače sa zračnom turbinom [5]

Ove plutače su komercijalizirane u Japanu od 1965. godine. Nešto kasnije, 1976. godine Masuda je promovirao novu, puno veću konstrukciju: barku (80 m x 12 m), nazvanu *Kaimei* (slika 3.2.), koja je korištena kao plutajuća testna platforma koja je sadržavala nekoliko *OWC*-a opremljenih sa različitim tipovima zračnih turbina. Vjerojatno zbog toga što je ovaj projekt urađen u počecima istraživanja tehnologija za iskorištavanje energije valova, razine izlazne snage u *Kaimei* projektu nisu bile zadovoljavajuće [6].



**Sl. 3.2.** Pretvarač energije valova Kaimei [6]

Naftna kriza 1973. godine je uzrokovala veliku promjenu u percepciji obnovljivih izvora energije i povećala je zanimanje za proizvodnjom energije iz valova. Rad objavljen 1974. godine u prestižnom časopisu Nature od strane Stephena Saltera sa *University of Edinburgh*, je skrenuo pažnju na energiju valova od strane međunarodnih znanstvenih zajednica [7]. Nakon toga, prvo britanska vlada, a zatim i norveška pokreću nekoliko projekata koji su imali za zadaću istraživanje i razvoj tehnologija za iskorištavanje energije valova. Počinju se održavati i prve konferencije vezane za energiju valova ( 1976. Canterbury i 1978. Heathrow). Neke od tehnologija razvijene za vrijeme britanskog valno-energetskog programa 1975.-1982. su: Cockerell-ov splav, Salterova patka, Bristolski cilindar i NEL oscilirajući vodeni stupac [8]. U Norveškoj je 1985. godine otvorena konstrukcija koju su činile dva, u punoj veličini, prototipa elektrane (snage 350 kW i 500 kW) na obali u Toftestallenu, kod Bergena (slika 3.3.) [10].



**Sl. 3.3.** Prototip elektrane na obali u Toftestallenu [10]

U narednim godinama, sve do ranih 90-ih, aktivnost u Europi je svedena na akademski nivo. Najvažniji projekt je bio mali *OWC* (snage 75 kW), prototip na obali otoka Islay, Škotska (1991.) (slika 3.4.) [9].



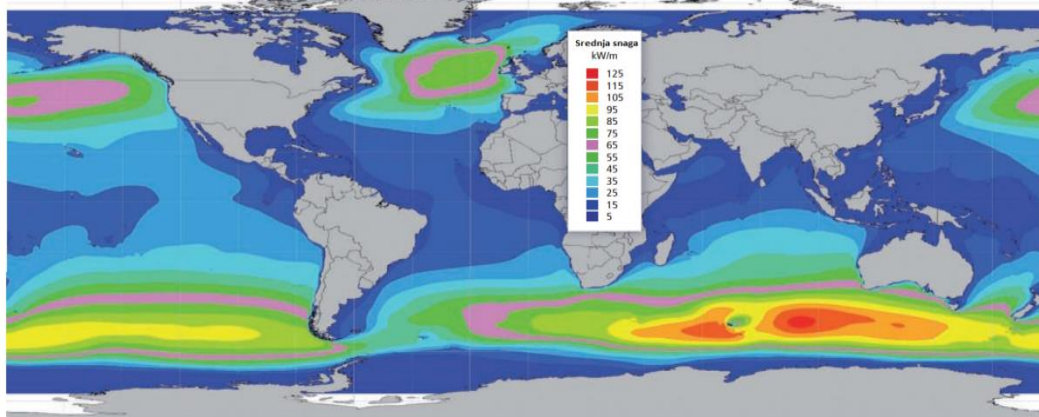
**Sl. 3.4.** *OWC* prototip 75 kW Islay, Škotska [9]

1990. dva *OWC* prototipa su konstruirani u Aziji: 60 kW pretvarač integriran u mol u luci Sakata u Japanu i 125 kW postrojenje u Trivandrumu, Indija.

Situacija u Europi se značajno promijenila odlukom iz 1991. godine od strane Europske komisije koja je uključila energiju valova u svoj program koji se bavi obnovljivim izvorima energije. Od tada utemeljeni su mnogi projekti od strane Europske komisije i može se reći da se na tom polju uočen napredak.

### **3.2. Geografski potencijal korištenja energije valova**

Prema istraživanjima koja su provedena u ime *International Panel on Climate Change* (IPCC), procjenjuje se da je teorijski ukupni potencijal energije valova 32 PWh/godišnje [11]. Slika 3.5. prikazuje raspored potencijala energije valova u svijetu, odnosno regionalnu raspodjelu energetskeg potencijala valova na godišnjoj razini. Sa slike se može zaključiti kako je najveći potencijal na prostoru između srednjih i visokih geografskih širina obiju zemljopisnih polutki.



**Sl. 3.5.** Regionalna raspodjela energetskeg potencijala valova na godišnjoj razini [12]

U tablici 3.1. može se vidjeti kako Azija, Australija, Sjeverna i Južna Amerika imaju najveću količinu energije valova. S obzirom da i zapadna obala Europe ima solidan potencijal, Zapadna i Sjeverna Europa postižu velike rezultate s obzirom na relativno malu veličinu. I na kraju Srednja Amerika, Mediteran i Atlantik imaju slab potencijal budući da se nalaze na srednjim geografskim širinama.

**Tab 3.1.** Regionalna podjela potencijala energije valova[12]

| REGIJA                                    | ENERGIJA VALOVA<br>(TWh/god.) |
|---|-------------------------------|
| Zapadna i Sjeverna Europa                 | 2800                          |
| Mediteran, Atlantik                       | 1300                          |
| Sjeverna Amerika i Grenland               | 4000                          |
| Srednja Amerika                           | 1500                          |
| Južna Amerika                             | 4600                          |
| Afrika                                    | 3500                          |
| Azija                                     | 6200                          |
| Australija, Novi Zeland i pacifički otoci | 5600                          |
| <b>UKUPNO</b>                             | <b>29500</b>                  |

Postoji mnogo različitih tipova tehnologija za iskorištavanje energije valova, polazeći od toga na koji način se energija apsorbira iz valova, i također ovisno na kojoj dubini vode i lokaciji (obala, u blizini obale, pučina). Nedavni osvrti su pokazali da postoji oko sto projekata u različitim fazama razvoja. Broj projekata se ne smanjuje, budući da novi koncepti i tehnologije zamjenjuju one koji su ugašeni. U biti, razvoj od koncepta do komercijalne faze je veoma težak, spor i skup proces. Iako je ostvaren značajan napredak u teorijskom i numeričkom modeliranju pretvarača energije valova i njihovog lanca pretvorbe energije, i dalje je testiranje modela u valnom bazenu veoma bitno, što je dugotrajan i skup proces. Zadnja faza je testiranje u stvarnim morskim uvjetima. U gotovo svakom sustavu, optimalna apsorpcija valne energije uključuje neku vrstu rezonancije, što upućuje da geometrija i veličina strukture je povezana sa valnom duljinom. Iz tog razloga, pilot postrojenja moraju biti velike strukture, ako će biti testirane u otvorenom oceanu. Zbog je teško valnim tehnologijama pratiti korak za npr. vjetro-industrijom: kod njih se prvo razvijaju relativno mali uređaji, koji se kasnije prilagođavaju većim veličinama i tako komercijaliziraju. Veliki troškovi izgradnje, implementacije, održavanja i testiranja velikih prototipa u nekad veoma teškim prirodnim uvjetima su spriječili razvoj sustava za iskorištavanje energije valova: u većini slučajeva takvi projekti su ostvareni u značajnu financijsku potporu od strane država (u slučaju Europe, od strane Europske Komisije).

### **3.3. Tehnologije za iskorištavanja energije valova**

Postoji nekoliko metoda za klasificiranje sustava za iskorištavanje energije valova, npr. u ovisnosti o lokaciji, načinu rada i veličini. Klasifikacija koja se nalazi dolje se temelji uglavnom na načinu rada. Navedeni primjeri nisu namijenjeni da prikažu sve projekte, nego samo one koji su doživjeli fazu prototipa ili su barem bili predmet opsežnih razvojnih napora.

1. Oscilirajući vodeni stupac (sa zračnom turbinom)
  - 1.1. Fiksirana struktura: dijeli se na izolirane (*Pico*, *LIMPET*) i one u lukobranu (*Sakata*, *Mutriku*)
  - 1.2. Plutajući (*Mighty Whale*, *Ocean Energy*, *Spar buoy*, *Oceanlinx*)
2. Oscilirajuća tijela (sa hidrauličkim motorom, hidrauličkom turbinom, linearnim električnim generatorom)
  - 2.1. Plutajući: dijeli se na one koji su u osnovi translacijski (*AquaBuoy*, *IPS Buoy*, *F03*, *WaveBob*, *PowerBuoy*) i one koji su u osnovi rotacijski (*Pelamis*, *PS Frog*, *SEAREV*)
  - 2.2. Potopljeni: također se dijele na one koji su u osnovi translacijski (*AWS*) i rotacijski (*WaveRoller*, *Oyster*)

### 3. Preljevajući uređaji (sa „low-head“ hidrauličnom turbinom)

3.1. Fiksirana struktura: dijeli se na one na obali (*Tapchan*) i u lukobranu (*SSG*)

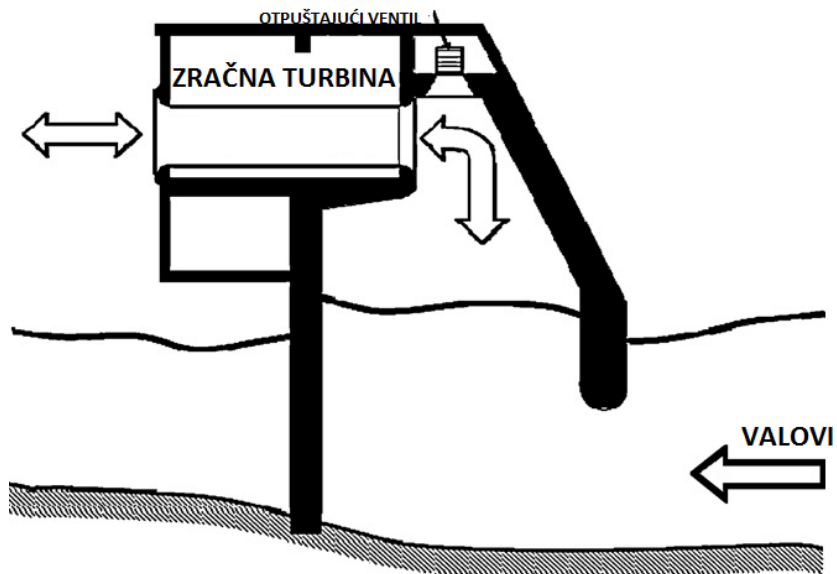
3.2. Plutajuća struktura (*Wave Dragon*)

#### 3.3.1. Oscilirajući vodeni stupac (OWC)

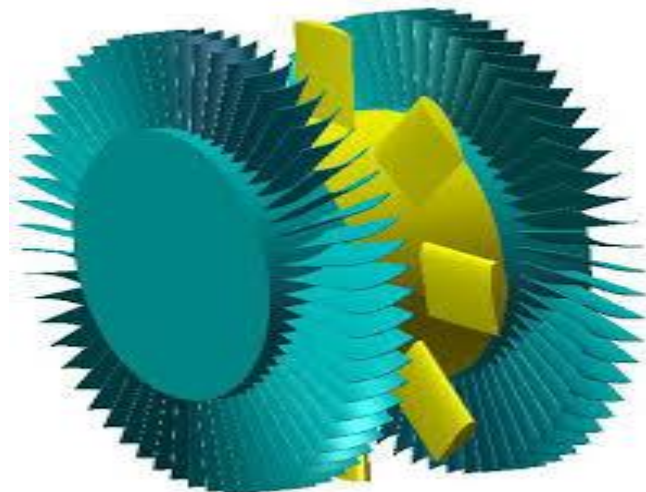
##### 1. Fiksirana struktura

Bazirana na različitim metodama „izvlačenja“ energije, mnogo različitih sustava je bilo predloženo, ali je samo nekoliko doživjelo fazu prototipa i implementaciju u otvorenu obalnu vodu. Većina je ili bila smještena na obali ili u blizini obale. U osnovi ovi uređaji stoje na dnu mora ili su pričvršćeni na stijenu. Uređaji na obali imaju prednost zbog lakše instalacije i održavanja, i ne zahtijevaju strukture za pričvršćivanje na dno u dubokim vodama (sidrišta) i velike podvodne električne kablove. Manja valna energetska klima na obali može biti kompenzirana sa prirodnom koncentracijom valne energije zbog refrakcije i/ili difrakcije (ako su uređaji pogodno smješteni za tu svrhu). Tipični uređaj prve generacije je oscilirajući vodeni stupac. Drugi primjer je preljevni uređaj (eng. *overtopping*) *Tapchan* (*Tapered Channel Wave Power Device*), prototip koji je izgrađen na norveškoj obali 1985. i koji je bio u pogonu nekoliko godina. Oscilirajući vodeni stupac (*OWC*) je uređaj koji sadrži djelomično potopljenu betonsku ili željeznu strukturu, otvorenu ispod vodene površine, unutar koje se nalazi zrak iznad površine vode (slika 3.6.). Oscilirajuće gibanje unutarnje slobodne površine, koje je uzrokovano incidentnim valovima, tjera zrak kroz turbinu koja onda pokreće električni generator. Aksijalna protočna Wells turbina je izumljena 1976. godine od strane Alan A. Wells-a za primjenu kod *OWC*-a i ima prednost što ne zahtijeva ispravljačke ventile (tj. samoispravljačke) [13]. Korišten je u većini prototipa (slika 3.7.). Najpopularnija alternativa Wells-ovoj turbini je samoispravljačka impulsna turbina, patentirana od strane I.A.Babinsten-a 1975. godine [14]. To je rotor u osnovi identičan rotoru konvencionalne jednostupanjske parne turbine aksijalno-protočnog impulsnog tipa.





Sl. 3.6. Presječni primjer oscilirajućeg vodenog stupca (OWC) pričvršćenog na dno



Sl. 3.7. Wells-ova turbina sa dvostrukim redom lopatica [13]

OWC je bila jedna od tehnologija čiji razvoj je financiran od strane britanskog programa za valnu energiju u drugoj polovici 1970-ih: takozvani *NEL* (*National Engineering Laborator*) OWC uređaj je bio napravljen od serije za dno pričvršćenih OWC komora raspoređenih kao terminator [15]. U punoj veličini OWC prototipi su bili izgrađeni u Norveškoj , Japanu, Indiji, Portugalu (slika 3.8.), Ujedinjenom Kraljevstvu (slika 3.9.).





**Sl. 3.8.** 400 kW postrojenje na otoku Pico, Portugal [16]



**Sl. 3.9.** 500 kW postrojenje LIMPET, otok Islay, Škotska [17]

Najveća od svih, u blizini obale na dnu pričvršćena elektrana naziva *OSPREY* je razorena od strane mora (1995). U svim ovim slučajevima struktura je fiksirana (na dnu ili izgrađena na stijeni) i glavni dio opreme je Wells-ova zračna turbina koja pogoni električni generator. Ovi uređaji zauzimaju područja u opsegu od 80 do 250 m<sup>2</sup>. Njihova instalirana snaga je bila u rasponu od 60 do 500 kW (2 MW je imao *OSPREY*). Manje snažni obalni *OWC* prototipi su izgrađeni na otoku Islay, UK, 1991. godine (75 kW) i Guangdong, Kina, 2001. godine (slika 3.10., 100 kW).



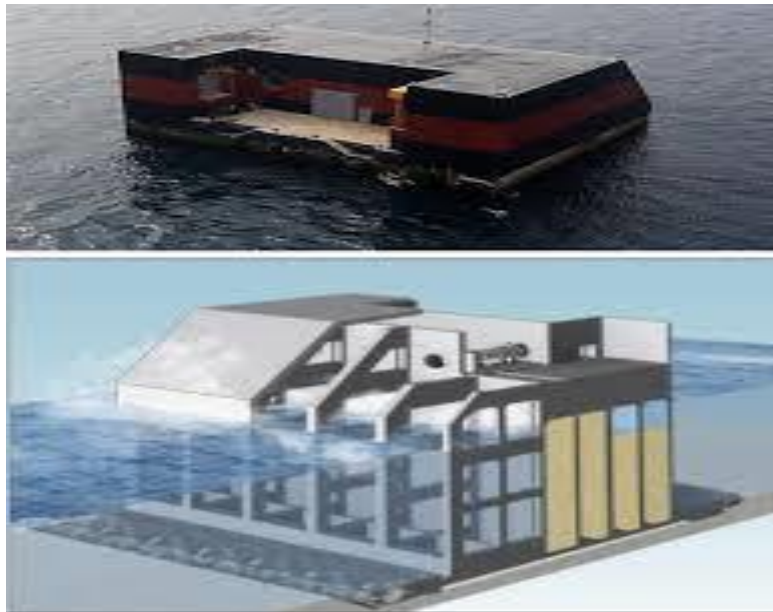
**Sl. 3.10.** 100 kW postrojenje, Guangdong, Kina [18]

Od 1980-ih godina je bilo teorijski i eksperimentalno utvrđeno da proces apsorpcije energije valova može biti poboljšan proširenjem komora izbočenjem zidova u smjeru valova, formirajući luku ili kolektor. Ovaj koncept je bio pušten u praksu u većini *OWC* prototipa. Australijska kompanija *Energetech* je razvila tehnologiju koristeći veliki parabolični kolektor (oblika kao *Tapchan* kolektor) za ovu svrhu: u blizini obale prototip, *Oceanlinx Mk 1*, je bio testiran 2005. u Australiji (slika 3.11.) [19].



**Sl. 3.11.** 500 kW postrojenje, Australija [19]

Na dnu pričvršćeni OWC, snage 500 kW, je bio instaliran 2015. godine, oko 1 km od obale u Južnoj Koreji (slika 3.12.). Postrojenje je dugačko 37 m i široko 31,2 m [20].



Sl. 3.12. 500 kW postrojenje u Južnoj Koreji [20]

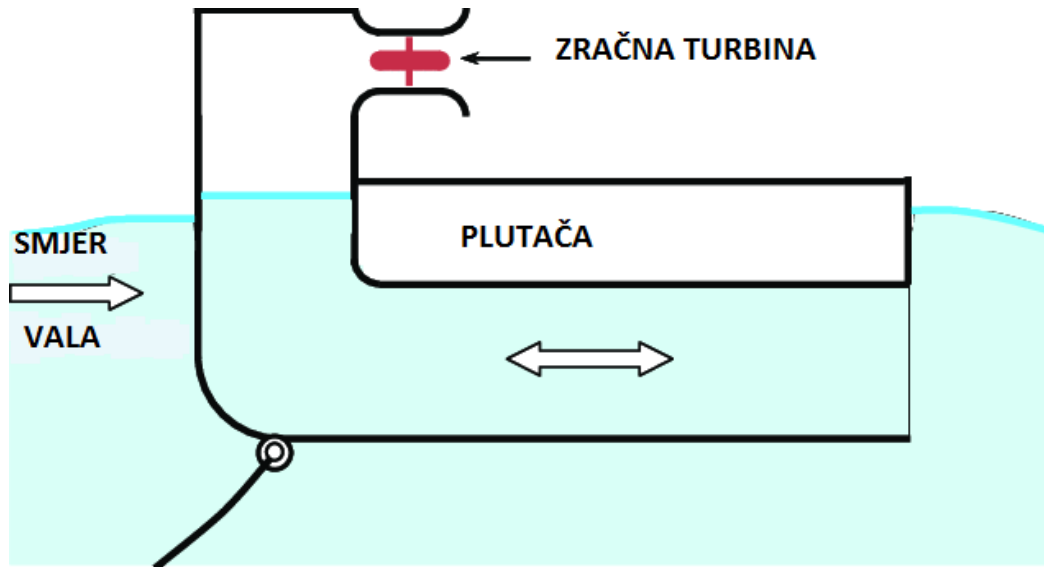
Dizajn i konstrukcija strukture (osim zračne turbine) je najkritičniji problem u OWC tehnologiji, i najutjecajniji na ekonomiju energije proizvedene iz valova. U sadašnjosti, izgradnja dominira u troškovima OWC postrojenja. Integracija strukture postrojenja u lukobran ima nekoliko prednosti: podjela troškova izgradnje, te pristup za izgradnju, djelovanje i održavanje postrojenja je olakšan. Ovo je prvi put uspješno izvedeno u Japanu 1990.

## 2. Plutajući OWC

Kao što je navedeno gore, prvi OWC pretvarači razmješteni u moru su bili plutajući uređaji razvijeni u Japanu 1960-ih i 1970-ih pod vodstvom Yoshio Masude: valno pogonjene navigacijske plutače i velika *Kaimei* barka. *Kaimei* je imao 13 komora otvorenih na dnu koje su izgrađene unutra trupa barke, gdje je svaka komora imala vodeno područje površine od 42 m<sup>2</sup> do 50 m<sup>2</sup>. To je bilo razmješteno na zapadnoj obali Japana u razdobljima 1978-1980 i 1985-1986. Testirano je nekoliko zračnih turbina, i jednosmjerne (koje zahtijevaju korištenje nepovratnih ispravljačkih ventila) i samoispravljačke turbine.

Masuda je shvatio da pretvorba energije iz valne u pneumatsku kod *Kaimei*-a je bila prilično nezadovoljavajuća i smislio je drugačiju geometriju za plutajuće OWC-ove: *BBDB* (*Backward Bent Duct Buoy*). Kod *BBDB*-a, OWC-ov kanal je savijen unatrag od smjera incidentnog vala (slika 3.13.) (što je zapravo prednost u odnosu na prednju verziju kanala). U ovom načinu,

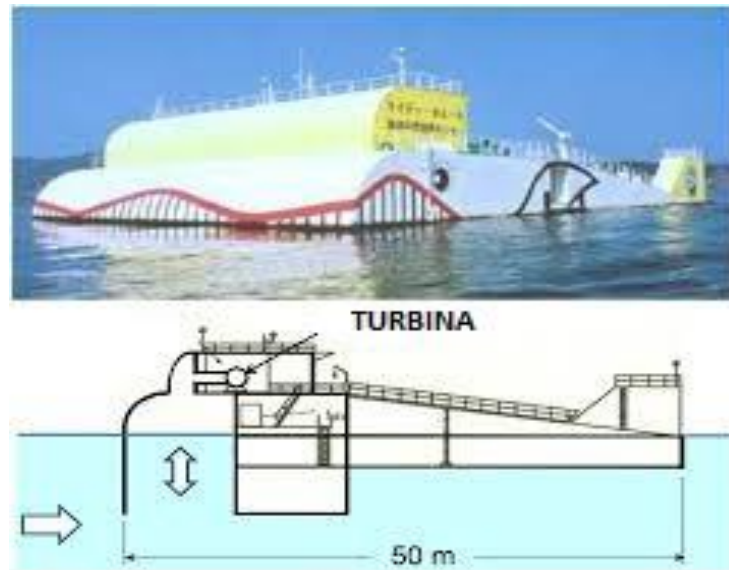
dužina vodenog stupca može biti napravljena dovoljno velika za postizanje rezonancije, uz održavanje nacrta plutajuće strukture unutar prihvatljivih granica. *BBDB* pretvarač je bio izučavan u nekoliko zemalja i nekad je pokretao oko 1000 navigacijskih plutača u Japanu i Kini. U zadnjih nekoliko godina, u tijeku su napori u Irskoj i SAD-u da se razvije veliki *BBDB* pretvarač za postavljanje u otvorenom oceanu [21].



Sl. 3.13. Shematski prikaz *BBDB-a*

*The Mighty Whale*, još jedan plutajući OWC pretvarač, je razvijen u Japanu. Nakon teorijskih istraživanja i testiranja u valnom bazenu, prototip u punoj veličini je dizajniran i izgrađen. Uređaj se sastoji od plutajuće strukture (dužine 50 m, širine 30 m), koji ima tri komore smještene na prednjem dijelu, jedna do druge, i spremnik za plovidbu. Svaka zračna komora je povezana sa Wells-ovom zračnom turbinom koja pokreće električni generator. Ukupna snaga je 110 kW. Uređaj je bio postavljen u Japanu, 1998. godine i testiran je nekoliko godina (slika 3.14.) [22].





**Sl. 3.14.** *Mighty Whale uređaj, Japan*

*The Spar Bouy* je vjerojatno najjednostavniji koncept za plutajući OWC. To je osnosimetrični uređaj (i tako neosjetljiv na smjer vala) koji se u osnovi sastoji od (relativno velike) potopljene vertikalne cijevi koja je otvorena na oba kraja, pričvršćena za plovak koji se kreće uglavnom uzdizanjem (vertikalno gibanje). Dužina cijevi determinira rezonanciju unutrašnjeg vodenog stupca. Protok zraka koji je pomaknut gibanjem OWC-a u odnosu na plutaču pokreće zračnu turbinu. Nekoliko tipova valno pogonjenih navigacijskih plutača je bilo bazirano na ovom konceptu, što je također bilo razmatrano za široku energetska proizvodnju. *The Spar Buoy* je vjerojatno bio prvi pretvarač valne energije koji je bio objekt detaljne teorijske studije. Na slici 3.15. se nalazi testni model *Spar Buoy*-a u omjeru 1:10 testiran 2012. u Sjevernoj Irskoj [23].



**Sl. 3.15.** *Model Spar Buoy-a u omjeru 1:10*

Strukture plutajućih OWC prototipa koje su opisane gore su labavo usidrene na morsko dno i zbog toga puno osciliraju (što može povećati apsorpciju valne energije ako je uređaj napravljen za tu svrhu).

Neki pretvarači energije valova koji su proučavani sastojali su se od više OWC-ova kod kojih nekoliko ili sve zračne komore dijele jednu jednosmjernu zračnu turbinu (češće nego dvosmjernu turbinu po komori). Osim kontrolnih ventila, ovo zahtijeva niskotlačne i visokotlačne zračne cijevi koje povezuju komore sa turbinom.

*LEANCON* je plutajući multi-OWC uređaj. OWC-ovi su raspoređeni u dva reda ispod dvije grede koje su povezane u obliku slova V. Svaka OWC komora je povezana preko nepovratnih ventila sa dvije cijevi koje napajaju konvencionalnu jednosmjernu zračnu turbinu. Taj model je testiran u Danskoj 2015. godine. Širina modela u obliku slova V je 24 m i promjer cilindričnog OWC-a je 0,5 m (slika 3.16.) [24].



**Sl. 3.16.** *Prikaz modela LEANCON (1:10), Danska*

### **3.3.2. Sustavi oscilirajućih tijela**

Uređaji na pučini (ponekad klasificirani kao treća generacija uređaja) su u osnovi oscilirajuća tijela, koja ili plutaju ili su skroz potopljena (ali mnogo rjeđe). Oni iskorištavaju mnogo snažnije režime valova koji su dostupni u dubokoj vodi (obično više od 40 m dubine vode). Oscilirajuća tijela proizvode energiju reagirajući na morsko dno ili na drugo oscilirajuće tijelo. Pretvarači energije valova na pučini su u osnovi više kompleksni nego prva generacija uređaja. Ovo, zajedno sa dodatnim problemima sa sidrištem, pristupu za održavanje i potrebom za dugačkim

podvodnim električnim kablovima, je omelo njihov razvoj, i samo nedavno su neki sustavi doživjeli, ili došli blizu, faze prototipa.

#### 1. Podizujuće plutače sa jednim tijelom (eng. *Single-body heaving buoys*)

Najjednostavniji uređaj oscilirajućih tijela je plutača koja se podiže i reagira na fiksiranu površinu (morsko dno ili na dnu pričvršćena struktura). U većini slučajeva, takvi sustavi su smišljeni kao točkasti apsorberi (tj. njihove horizontalne dimenzije su mnogo manje nego valna duljina).

Rani primjer je bila norveška plutača, koja se sastojala od kuglaste plutače koja je mogla izvoditi podizajuće oscilacije u odnosu na podupirač koji je povezan sidrom sa morskim dnom. Plutača je mogla biti fazno kontrolirana preko kvaki i bila je opremljena sa zračnom turbinom. Model (promjer plutače 1 m), u kojem je zračna turbina simulirana preko otvora, je testiran u Trondheim Fjord 1983. godine (slika 3.17.) [25].

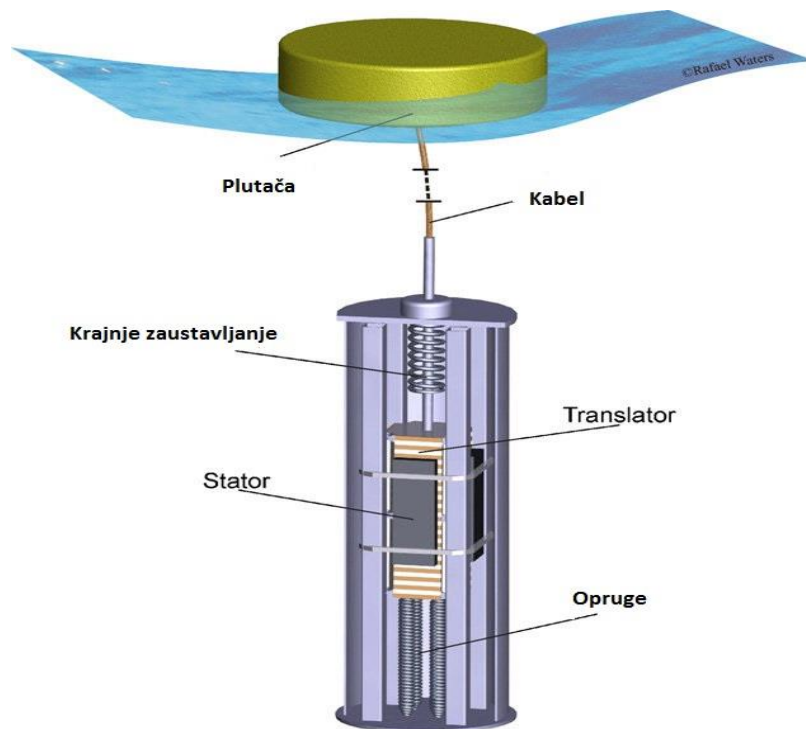


**Sl. 3.17.** *Prikaz podizujuće plutače, Norveška*

Alternativni dizajn je plutača povezana sa strukturom pričvršćenom na dnu preko kabla koji se čvrsto drži oprugom ili sličnom spravom. Relativno gibanje između splava na morskoj površini aktiviranog valovima i strukture na dnu aktivira PTO sustav. U uređaju koji testiran u Danskoj u ranim 1990-im, PTO se sastojao od klipne pumpe koja je opskrbljivala visokotlačnu vodu za hidrauličnu turbinu.

Verzija zategnuto-usidrene plutače je bila razvijena u Švedskoj i koristila je linearni električni generator koji je bio smješten na dno oceana. Vod sa vrha generatora je povezan sa plutačom

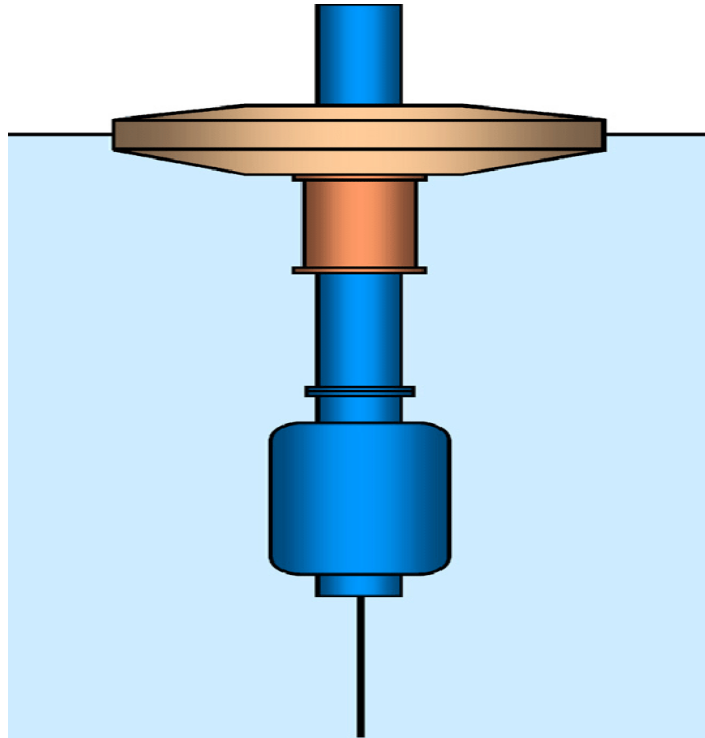
koja je smještena na površini oceana, ponašajući se kao sustav za napajanje (eng. *power take-off* ili *PTO*). Opruge povezane sa translatorom generatora skladište energiju tijekom polovice valnog ciklusa i istovremeno se ponašaju kao povratna sila u valu (slika 3.18.) [26].



**Sl. 3.18.** Prikaz podizuće plutače sa linearnim električnim generatorom

Još jedan sustav sa plutačom koja se podiže pogoneći linearni električni generator je bio razvijen u SAD-u. Sastoji se od jarbola i prstenaste plutače u obliku tanjura (slika 3.19.). Jarbol je čvrsto usidren na dno sa kabelom. Plutača se može slobodno uzdizati u odnosu na jarbol, ali je ograničena u svim ostalim kutovima preko linearnog sustava ležaja. Sile koje su se nametnule na jarbol preko relativne brzine dva tijela pretvaraju se u električnu energiju preko permanentnog linearnog generatora. Jarbol je dizajniran da pruži dovoljni uzgon kako bi se suprotstavio snazi generatora u smjeru dolje. 10 kW prototip *L-10* je testiran 2008. godine [27].



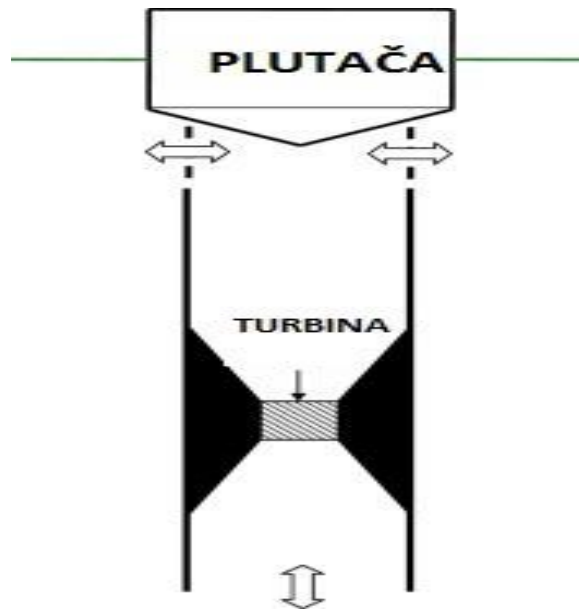


**Sl. 3.19.** Prikaz *L-10* plutače sa linearnim električnim generatorom

## 2. Sustavi podizućih plutača sa dva tijela (eng. *Two-body heaving systems*)

Koncept pojedinačnih plutajućih tijela koji reagiraju na morsko dno može izazvati poteškoće zbog udaljenosti između površine i dna i/ili zbog plimskih oscilacija u razini mora. Sustavi sa više tijela se mogu koristiti umjesto toga, u kojim se energija pretvara preko relativnog gibanja između dva tijela koja osciliraju drugačije.

Zanimljiv točkasti apsorber sa dva tijela za pretvorbu energije valova je *IPS* plutača, izumljena 1978. godine i prvotno je razvijena u Švedskoj od kompanije *IPS (Interproject Service)*. Sastoji se od plutače kruto povezane sa potpuno potopljenom vertikalnom cijevi (tzv. akceleracijska cijev) otvorena na oba kraja (slika 3.20.). Cijev sadrži klip čije gibanje u odnosu na sustav sa plutajućom cijevi (eng. *float-tube system*) (gibanje nastalo djelovanjem vala na plutaču i inercijom vode koja se nalazi u cijevi) pogoni PTO mehanizam. Isti izumitelj kasnije (1981.) je predstavio poboljšanje koje je značajno pridonijelo rješavanju problema krajnjeg zaustavljanja: središnji dio cijevi, uz koju klip klizi, zvuči na oba kraja kako bi ograničio udar klipa. Prototip je testiran u Švedskoj u ranim 1980-im [28].



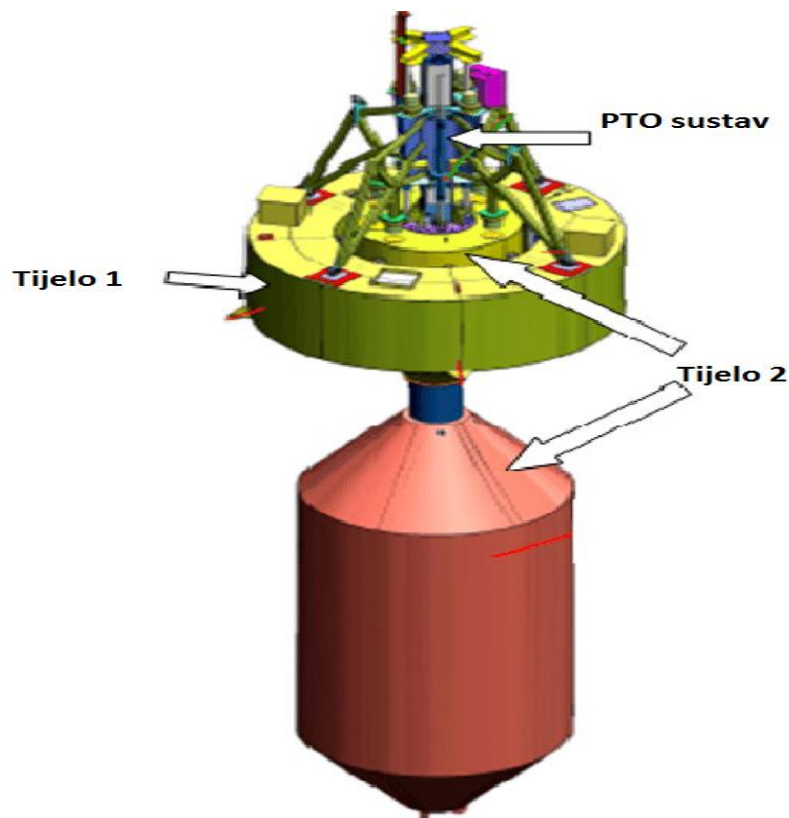
**Sl. 3.20.** Shematski prikaz IPS plutače

*AquaBuOY* je pretvarač energije valova , razvijen u 2000-im, koji kombinira koncept *IPS* plutače sa parom crijevnih pumpi za proizvodnju protoka vode pri visokom tlaku koji pogoni Peltonovu turbinu. Na slici 3.21. se nalazi prototip *AquaBuOY*-a postavljen i testiran 2007. u Tihom oceanu na obali Oregona [29].



**Sl. 3.21.** Prikaz prototipa *AquaBuOY*-a u Tihom oceanu

*Wavebob*, razvijen u Irskoj, je još jedan podizujući uređaj sa dva tijela. Sastoji se od dvije koaksijalne osnosimetrične plutače, čija relativna aksijalna gibanja se pretvaraju u električnu energiju preko visokotlačnog uljnog sustava (slika 3.22.). Unutrašnja plutača (tijelo 2 na slici 3.22.) je kruto povezana sa koaksijalnim potopljenim tijelom smještenim ispod, čija je funkcija povećati inerciju (bez smanjenja u uzbuđenju i radijaciji hidrodinamičkih sila) i dopušta ugađanje prosječnoj valnoj frekvenciji. Model je testiran u Irskoj [30].



**Sl. 3.22.** Prikaz uređaja *Wavebob*

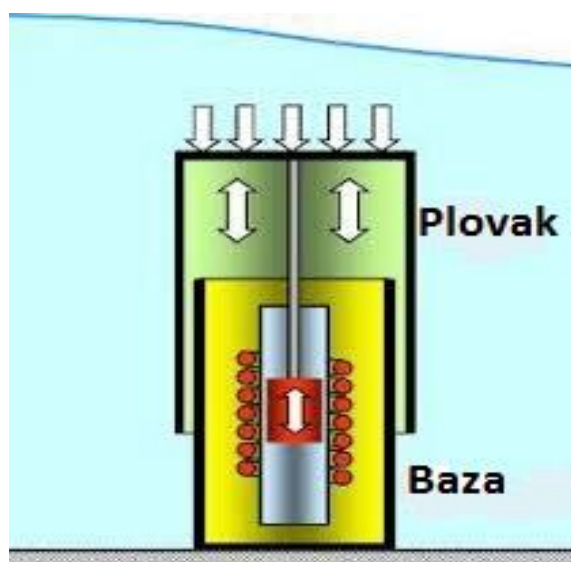
Američka tvrtka *Ocean Power Technologies* je razvila još jedan osnosimetrijski podizujući pretvarač sa dva tijela naziva *PowerBuoy*. Plutača u obliku diska djeluje na potopljeno simetrično tijelo, zatvoreno na njegovom donjem kraju sa velikom horizontalnom prigušnom pločom čija je funkcija je povećanje inercije kroz dodanu masu vode koja ju okružuje. Relativno heaving gibanje između dva tijela se pretvara u električnu energiju preko hidrauličkog PTO. 40-kW prototip bez povezanosti sa mrežom je razvijen kod obale u sjevernoj Španjolskoj, 2008. godine. (slika 3.23.) [31].



**Sl. 3.23.** *Prikaz prototipa PowerBuoy*

### 3. Potpuno potopljeni podizujući sustavi

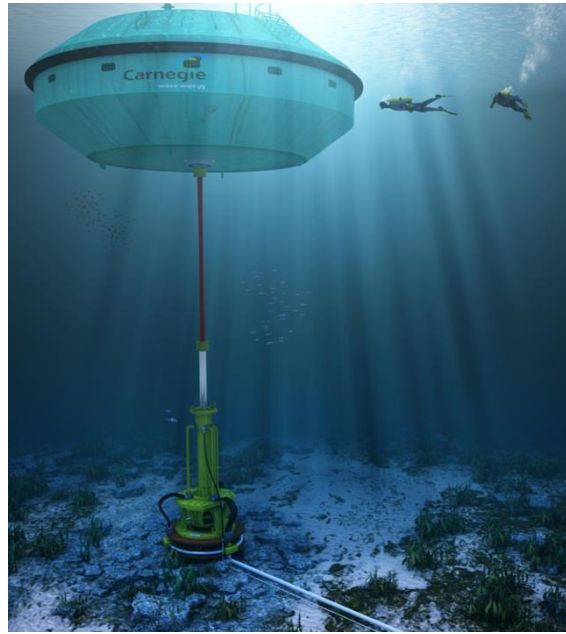
Arhimedova valna ljujačka (eng. AWS), potpuno potopljen podizujući uređaj, je u osnovi razvijen u Nizozemskoj, i sastoji se od oscilirajućeg gornjeg dijela (plovak) i donjeg dijela koji je pričvršćen za dno (podrum) (slika 3.24.). Plovak je gurnut dolje ispod valnog brijega i pomiče se ispod valne doline. Ovom gibanju se opire linearni električni generator, sa unutrašnjim tlakom zraka koji djeluje kao opruga [32].



**Sl. 3.24.** *Shematski prikaz Arhimedove valne ljujačke*

AWS uređaj je prošao nekoliko godina kroz program teorijskog i fizikalnog testiranja. Prototip je izgrađen, snage 2 MW (maksimalna trenutna snaga). Nakon neuspješnih proba u 2001. i 2002.

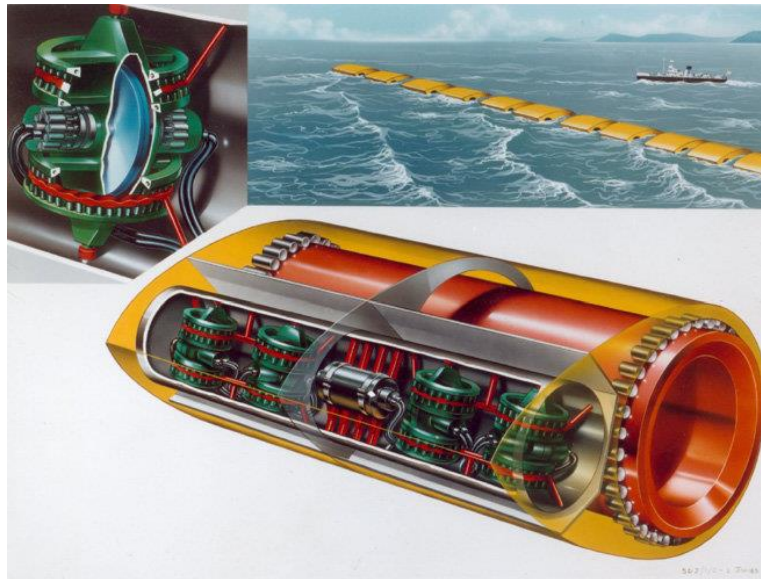
da ga se postavi na položaj kod sjeverne obale Portugala, konačno je postavljen i testiran 2004.[33]. AWS je bio prvi pretvarač koji je koristio linearni električni generator. Još jedan potpuno potopljen, nominalno podizuč, tijelo je *CETO*, razvijen u Australiji. Vertikalno gibanje čvrsto usidrene plutače pogoni visokotlačni vodeni klip pumpe. Ostatak od PTO-a je smješten na obali. 80 kW uređaj promjera 7 m je testiran 2011. (slika 3.25.) [34].



**Sl. 3.25.** Prikaz *CETO* pretvarača energije valova

#### 4. Bacajući uređaji (eng. *Pitching devices*)

Oscilirajuća tijela pretvarači energije valova opisani gore su nominalno podizučni sustavi, tj. pretvorba energije je povezana sa relativnim translacijskim gibanjem. Postoje i drugi sustavi oscilirajućih tijela u kojima se pretvorba energije temelji na relativnoj rotaciji više nego translaciji. Jedan od primjera je *Salter*-ova patka (izumitelj Salter), vjerojatno i najpoznatiji uređaj na pučini od onih koji su se pojavili u 1970-im i ranim 1980-im, i od kojeg je nekoliko verzija razvijeno u narednim godinama. Prve verzije su se sastojale od niza patki montiranih na dugačku kralježnicu poravnatih sa smjerom valnog brijega, sa hidrauličko-električnim PTO sustavom. Salter je kasnije predložio solo patku, u kojoj referentni okvir na koji djeluje klimajuća patka osigurava žiroskop (slika 3.26.). Koncept patke je bio objekt iscrpnih istraživanja, uključujući i testiranje modela, ali nikada u punom opsegu u moru [7].



Sl. 3.26. Prikaz Salterove patke

Među različitim uređajima koji su predloženi u 1970-im i 1980-im koji nisu ostvarili punu testnu fazu, treba napomenuti *Raft* izumljen od strane Christopher Cockerell-a. Ovo je u stvari serija splavova ili pontona koji su povezani šarkama, koji prate valnu konturu, sa PTO sustavom (moguće i hidrauličkim) smještenim na svakoj šarki[7]. *Cockerell Raft* se može smatrati i prethodnikom mnogo uspješnijeg uređaja, *Pelamis*-a, i također *McCabe*-ove valne pumpe (*McCabe Wave Pump*).

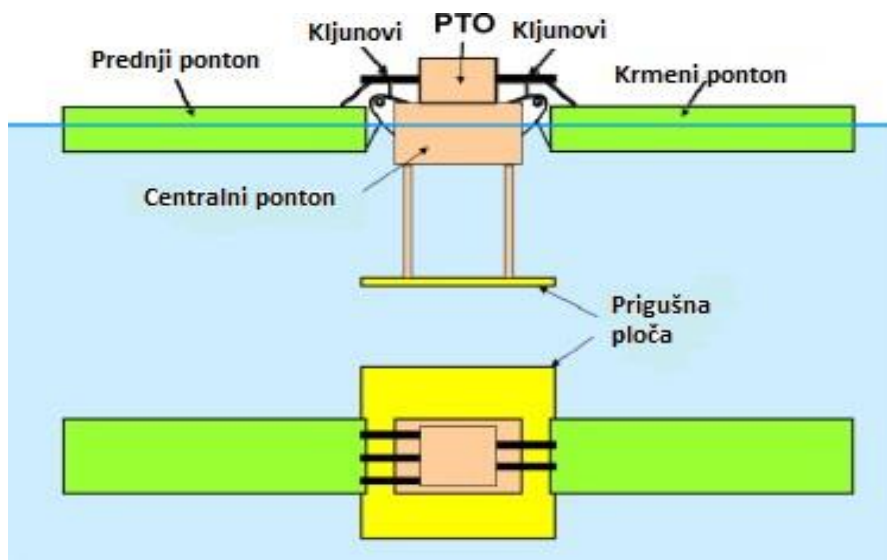
*Pelamis*, razvijen u Velikoj Britaniji, je struktura nalik na zmiju, labavo usidrena, koja se sastoji od četiri cilindrična dijela koji su međusobno povezani zglobnim šarkama, i poravnati su sa smjerom vala. Valovima induciranim gibanjem ovih spojeva opiru se hidraulički kljunovi, koji pumpaju visokotlačno gorivo kroz hidrauličke motore pogoneći tri električna generatora. Plinski akumulatori pružaju pohranu energije. Kao i drugi uređaji koji su doživjeli punu veličinu i *Pelamis* je bio objekt detaljnog razvojnog programa nekoliko godina, koji su uključivali teorijsko/numeričko modeliranje i fizikalni model testiran na nekoliko skala. Morske probe prototipa u punoj veličini (120 m dugačak, promjer 3,5 m, 750 kW snaga) su bile 2004. godine u Škotskoj. Sklop od 3 *Pelamis* uređaja su djelovali nekoliko mjeseci u blizini portugalske obale u 2008. godini (slika 3.27.), te tako čineći prvu svjetsku valnu farmu koja je povezana sa mrežom [35]. Iako je razvoj *Pelamis*-a ukinut prije nekoliko godina, čini se da je veoma sličan uređaj nedavno konstruiran u Kini.





SI. 3.27. Prikaz 3 spojena Pelamis uređaja, Portugal

*McCabe*-ova valna pumpa ima konceptualne sličnosti sa *Cockerell*-ovim splavom i *Pelamis*-om: sastoji se od tri pravokutna željezna pontona koja su međusobno povezana, sa podizućim gibanjem središnjeg pontona prigušenog sa potopljenom horizontalnom pločom (slika 3.28.). Dva sklopa hidrauličkih kljunova i hidraulički PTO pretvaraju relativna rotacijska gibanja pontona u korisnu energiju. 40 m dugački prototip je bio postavljen 1996. godine u blizini obale u Irskoj[36].



SI. 3.28. Prikaz McCabe-ove valne pumpe

*SeaRay*, razvijen u SAD-u je veoma sličan *McCabe*-ovoj valnoj pumpi. Sastoji se od dva tijela koji mogu oscilirati u najvišoj točki s obzirom na središnje dugačko cilindrično tijelo čija inercija

je uvećana sa potopljenom pločom. Relativno gibanje je direktno pretvoreno preko električnog generatora. Model je testiran 2011. kod Seattle-a. Na slici 3.29. je prikazan njegov koncept[37].



**Sl. 3.29.** Prikaz *SeaRay* koncepta

#### 5. Viseći i na dnu zaglobljeni uređaji

Bili su predloženi oscilirajući uređaji sa jednim tijelom koji rade u „pitching“ načinu rada, bazirani na konceptu visećeg njihala ili na obrnutom njihalu zaglobljenom na morskom dnu. Ovakav koncept je razvijen u Japanu u ranim 80-im godinama 20. stoljeća. U osnovi se sastoji od kaveza na dnu koji je otvoren prema moru. Pri regularnim valovima, kada je kavez propisne veličine, rezonancija je stvorena višebrojnim refleksijama na stražnjem zidu i na ulazu. Energija se estrahira iz valnog sustava preko ljuljajućeg gibanja ravne ploče koja visi kao njihalo sa vrha kaveza, obuhvaćajući širinu kaveza i protežajući se prema dolje blizu dnu. Gibanje ploče se pretvara u korisnu energiju visokotlačnog hidrauličkog kruga[38].

Dva uređaja, *Oyster* i *Waveroller*, dijele isti osnovni koncept: plutajuća zaklopka zaglobljena na morskom dnu, čije „pitching“ oscilacije aktiviraju sklop dvostruko djelujućih hidrauličkih kljunova smještenih na morskom dnu koje pumpaju visokotlačni fluid na obalu putem podmorskog plinovoda. Protok tekućine se pretvara u električnu energiju preko konvencionalnog hidrauličkog kruga. Ovi uređaji su namijenjeni za razvoj blizu obale u relativno plitkoj vodi (10-15 m). Osim veličine (*Oyster* je veći) i detaljnog dizajna, postoje i neke konceptualne razlike između njih. *Oyster* ima površinsku prodornu zaklopku koja obuhvaća čitavu dubinu vode i fluid je morska voda koja napaja Peltonovu turbinu smještenu na obali, dok *Waveroller* je potpuno potopljen i koristi ulje kao radni fluid. Nekoliko ljuljajućih zaklopki mogu napajati obalni



generator, privržen jednom višerazinskom cjevovodu. 3,5 m visok, 4,5 m širok prototip *Waveroller*-a je testiran 2008. kod portugalske obale. Veliki *Oyster* prototip je izgrađen u Škotskoj i tamo testiran 2010 (slika 3.30.) [39,40].



**Sl. 3.30.** Prototip *Oyster* uređaja

#### 6. Sustavi sa više tijela

U nekim slučajevima, uređaj se sastoji od velikog sklopa plutajućih točkastih apsorbера koji reagiraju na zajedničku podlogu i dijele zajednički PTO.

Valna zvijezda (*Wave Star*), razvijen u Danskoj, sastoji se od dva pravocrtna niza blisko raspoređenih plovaka smještenih na obje strane velike na dnu stojeće željezne strukture koja je poravnata sa dominantnim smjerom vala i sadrži hidraulički PTO koji se sastoji od visokotlačnog uljnog hidrauličkog kruga opremljen sa hidrauličkim motorima. Valovi čine da se plutače ljuljaju oko njihovog zajedničkog referentnog okvira i pumpaju ulje u hidraulički krug. Na slici 3.31. se može vidjeti prototip *Wave Star* uređaja sa dva plovka promjera 5 m, svaki snage 25 kW, i testiran je u Danskoj 2009. godine [41].



**Sl. 3.31.** Prototip Wave Star-a testiran u Danskoj 2009.

Brazilski hiperbarični uređaj je baziran na sličnom konceptu, glavne razlike su te da referentni okvir oko kojih se plutače ljuljaju je vertikalni lukobran, i voda se pumpa za pokretanje Peltonove turbine u krugu koji uključuje zračni akumulator (akumulator zraka). Model (1:10) je testiran 2006. u velikom valnom spremniku. Dvodijelni prototip ovog uređaja je instaliran u lukobranu, u Brazilu, 2012. godine (slika 3.32.) [42].



**Sl. 3.32.** Dvodijelni prototip hiperbaričnog uređaja instaliranog u lukobran, Brazil

### 3.3.3. Preljevajući pretvarači (eng. *Overtopping converters*)

Drugačiji način pretvaranja valne energije je uhvatiti vodu koja je blizu valnom brijegu i uvesti ga, preko prelijevanja, u rezervoar gdje se čuva na razini višoj od prosječnog nivoa slobodne

površine okolnog mora. Potencijalna energija pohranjene vode se pretvara u korisnu energiju kroz više ili manje konvencionalne „low-head“ hidrauličke turbine. Hidrodinamika preljevajućih uređaja je vrlo nelinearna, i ne može se riješiti linearnom valnom teorijom.

*Tapchan*, uređaj razvijen u Norveškoj u 1980-im, je baziran na ovom principu. Prototip (snage 350 kW) je izgrađen 1985. i radio je oko 6 godina. *Tapchan* se sastoji od kolektora, pretvarača, rezervoara vode i „low-head“ vodene turbine. Kolektor u obliku roga služi svrsi koncentriranja nadolazećih valova prije nego dođu u pretvarač. U prototipu izgrađenom u Norveškoj, kolektor je bio ugrađen u stijenu i širok je oko 60 m kao ulaz. Pretvarač je postepeno sužavajući kanal sa zidom visine jednakoj razini punjenja rezervoara (oko 3 m). Valovi ulazi u široki završetak kanala i dok se šire niz suženi kanal, visina vala se povećava dok valni brijegovi se ne preliju preko zidova i napune rezervoar vode. Kao rezultat, valna energija je postepeno transformirana u potencijalnu energiju u rezervoaru. Glavna funkcija rezervoara je da pruži stabilnu opskrbu vode turbini. To mora biti dovoljno veliko da izjednači fluktuacije u protoku vode koja se prelijeva iz pretvarača (oko 8500 m<sup>2</sup> površina u norveškom prototipu). Konvencionalna „low-head“ Kaplanova aksijalna protočna turbina se napaja na ovaj način.

U drugim preljevajućim pretvaračima, incidentni valovi preljevaju nagnuti zid ili rampu i pune rezervoar gdje je voda skladištena na višoj razini nego okolno more. Ovo je slučaj kod *Wave Dragon*-a, pretvarač na pučini razvijen u Danskoj, čija labavo usidrena plutajuća struktura se sastoji od dva valna reflektora koja fokusiraju nadolazeće valove prema dvostruko zakrivljenoj rampi, rezervoaru i sklopu „low-head“ hidrauličkih turbina. 57 m širok, 237 t prototip *Wave Dragon*-a je bio postavljen u Danskoj 2003. i testiran je nekoliko godina (slika 3.33.) [43].



**Sl. 3.33.** Prototip *Wave Dragon* uređaja postavljenog u Danskoj 2003. godine

Još jedan uređaj baziran na konceptu nagnutog zida je *Seawave Slot-Cone Generator (SSG)* razvijen za integraciju u lukobranu (slika 3.34.). Princip je baziran na preljevanju valova koristeći ukupno tri rezervoara postavljena jedan iznad drugog. Voda ulazi u rezervoar kroz dugačke horizontalne otvore na nagnutom zidu lukobrana, na razinama koje odgovaraju trima rezervoarima, i prolazi kroz višerazinsku hidrauličku turbinu za proizvodnju električne energije [44].



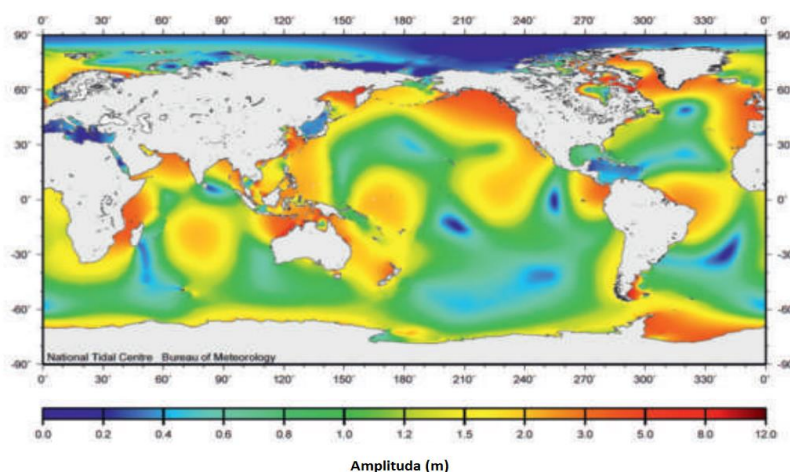
**Sl. 3.34.** *Seawave Slot-Cone Generator implementiran u nagnuti lukobran*

## 4. TEHNOLOGIJE ZA ISKORIŠTAVANJE ENERGIJE PLIME I OSEKE<sup>3</sup>

### 4.1. Potencijal korištenja energije plime i oseke

Klima i oseka su rezultat interakcije gravitacije Sunca, Zemlje i Mjeseca. Razlika između plime i oseke može biti veća od 12 m, stvarajući potencijalnu energiju. Protok uslijed podizanja i opadanja morskih struja stvara kinetičku energiju. Ove tehnologije iskorištavaju potencijalnu energiju stvorenu razlikom između oseke i plime. Takvi uvjeti postoje na lokacijama gdje uslijed geoloških i ekoloških uvjeta, velike mase vode teku u složena područja ili zaljeve i estuarije. Osim toga, plima i oseka su predvidive, pošto proizvodnja energije nije uvjetovana vremenskim uvjetima, nego gravitacijom Mjeseca, Sunca i Zemlje, omogućavajući predviđanja dvotjednih, dvogodišnjih i godišnjih ciklusa. Oba oblika energije mogu biti iskorištena pomoću raznih tehnologija kao obnovljivi izvor energije.

Velik je potencijal energije plime i oseke (procijenjen je na oko 3 TW). Tehnički iskoristiva energija, ona koja se nalazi u blizini obala, je procijenjena na oko 1 TW. Oblik obala također utječe na razliku između plime i oseke. Argentina, Australija, Kanada, Čile, Kina, Kolumbija, Francuska, Japan, Rusija, Južna Koreja, Španjolska, UK i SAD imaju veoma visoku plimnu amplitudu.



Sl. 4.1. Razina plimne amplitude u svijetu

Za tehnologije, brzina struje moraju biti najmanje 1,5-2 m/s. Izvori za ove tehnologije su veoma veliki, ovisеći o obliku obale. Za Europu iskoristiva energija je procijenjena na oko 12000 MW.

<sup>3</sup> 4. odlomak se temelji na [45]



## 4.2. Povijest korištenja elektrana na plimu i oseku

Tehnologije za iskorištavanje energije plime i oseke nisu novost: primjeri sežu još u doba Rimskog carstva, te postoje i brojni ostaci ruševina raznih mlinova koji su iskorištavali plimu i oseku. Od 1960-ih samo je nekoliko projekata doživjelo komercijalizaciju. Ipak, nove tehnologije su doživjele znatan napredak u zadnjih nekoliko godina i postoji nekoliko demonstracijskih projekata u punoj veličini.

Prvo postrojenje za iskorištavanje energije plime i oseke je bilo napravljeno u sjeverozapadnoj Francuskoj 1966. godine, ali zbog planova za prelazak na nuklearnu energiju daljnja istraživanja energije plime i oseke su prestala. Postrojenje *La Rance* je i dugo vremena bilo najveća plimna elektrana na svijetu instalirane snage 240 MW. Na slici 4.2. se može vidjeti kako izgleda ta elektrana.



**Sl. 4.2.** Prva elektrana na plimu i oseku na svijetu, *La Rance*, Francuska

Između 1966. i 2011. nekoliko je malih postrojenja izgrađeno u državama kao što su Kanada, Kina (*Lu*), Iran (*Gorji-Bandpy*, *Azimi* i *Jouya*) i Rusija, gdje postoji veliki potencijal. Najveće i najnovije postrojenje u svijetu je brana *Sihwa*, u Južnoj Koreji, izgrađena 2011. a puštena u rad 2012. godine. *Sihwa* brana, sa kapacitetom od 254 MW, je primjer multifunkcionalnog postrojenja, koje poboljšava ekologiju ranije zatvorenog morskog prolaza stvarajući otvore u postojećoj brani i instalirajući hidroelektranu. Ovaj projekt je primjer postrojenja, gdje prednost ima ekološka kvaliteta vode. *Sihwa* brana je prikazana na slici 4.3..



**Sl. 4.3.** Prikaz najveće elektrane na plimu i oseku u svijetu, Sihwa brana, Južna Koreja

### **4.3. Princip rada**

Mnoga konvencionalna postrojenja na plimu i oseku koriste cijevne turbine, koje su usporedive sa turbinama u hidroelektranama koje su instalirane u brani.

Ove tehnologije imaju nekoliko opcija za generiranje snage:

1. Generiranje snage pomoću struje oseke

Rezervoar se napuni za vrijeme plime kroz odvodna vrata ili ventile koji se zatvore kada plima dosegne najveći nivo. Za vrijeme oseke, voda u rezervoaru je puštena kroz turbine i tako se generira snaga. Sa ovim ciklusom, snaga se generira samo 4 sata dnevno. *Annapolis* u Kanadi je primjer ovakvog postrojenja.

2. Generiranje snage preko struje plime

Za vrijeme plime odvodna vrata su zatvorena kako bi se izolirao rezervoar dok je na najnižoj razini. Kada je plima velika, voda iz mora se pušta u spremnik prolazeći kroz turbine, tako generirajući snagu. Nedostatak ovog ciklusa je što ima manji kapacitet i generira manje električne energije, i može biti ekološki nepovoljno jer se nivo vode zadržava dugo vremena na niskoj razini. *Sihwa* je primjer ovakvog postrojenja.

### 3. Generiranje snage u oba smjera

I dolazeće i odlazeće struje generiraju snagu kroz turbine. Ovaj ciklus generira snagu po 4 sata 2 puta dnevno. Primjer ovakvog postrojenja je *La Rance*; crijevne turbine mogu također pumpati vodu za optimizaciju.

Nekoliko novih inovacija je razmatrano. Jedna od njih su tzv. „grebeni“ koji bi imali manju razliku između plime i oseke (2-3 m) za razliku od konvencionalnih. Prednost manje razlike u amplitudi je smanjenje utjecaja na okoliš i olakšana konstrukcija uslijed nižeg tlaka na strukturi. Loša strana je što bi manja amplituda malo smanjila učinkovitost turbine za vrijeme punog protoka.

„Lagune“ su još jedan primjer novih inovacija. One su slične konvencionalnim postrojenjima, samo što ne moraju nužno biti spojene na obalu, nego mogu biti i na pučini. Imaju manji utjecaj na okoliš od konvencionalnih postrojenja, te koriste tehniku vrlo male amplitude (između 0,5 i 1 m). Nekoliko je ovakvih tehnika već razvijeno, većinom od strane raznih sveučilišta i tvrtki u Velikoj Britaniji.

Postoje još i tzv. „ograde“ koje bi se sastojale od nekoliko individualnih turbina sa vertikalnom osi koje su povezane jedna sa drugom preko strukture koja je poput ograde. Ograda, može biti postavljena između kopna i bliskog otoka, ili između dva otoka. Ovaj tip je još uvijek u ranim fazama razvoja i ne postoje još prototipi koji su testirani u vodi.

## 4.4. Tehnologije za iskorištavanje energije plime i oseke

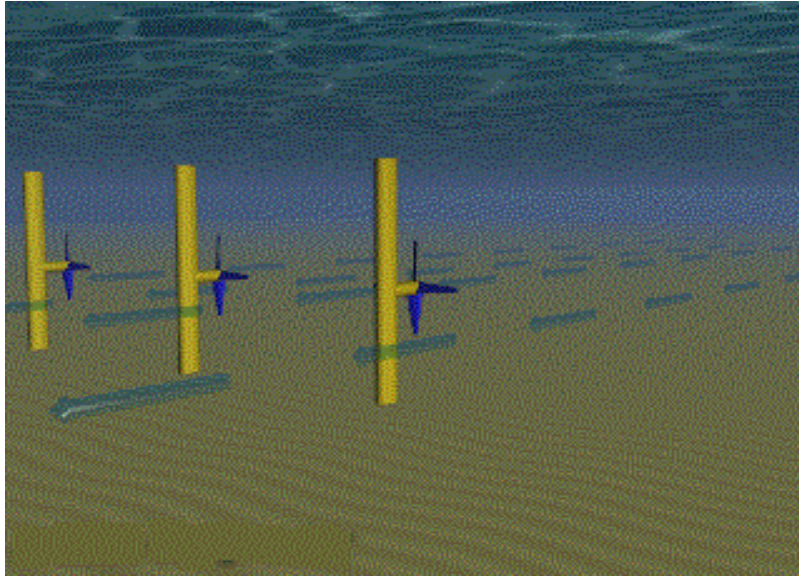
Tehnologije za iskorištavanje energije plime i oseke su napravile ogromne korake u razvoju prema komercijalizaciji u posljednjih nekoliko godina. Oko 40 novih uređaja je trenutno razvijeno i nekoliko njih je testirano u punoj veličini.

Ove tehnologije pretvaraju kinetičku energiju u korisnu energiju. Razvoj tehnologije je tekao sa razvojem vjetroturbina. Iako većina većih projekata koristi turbine sa horizontalnom osi, razlikuju se 3 glavne kategorije:

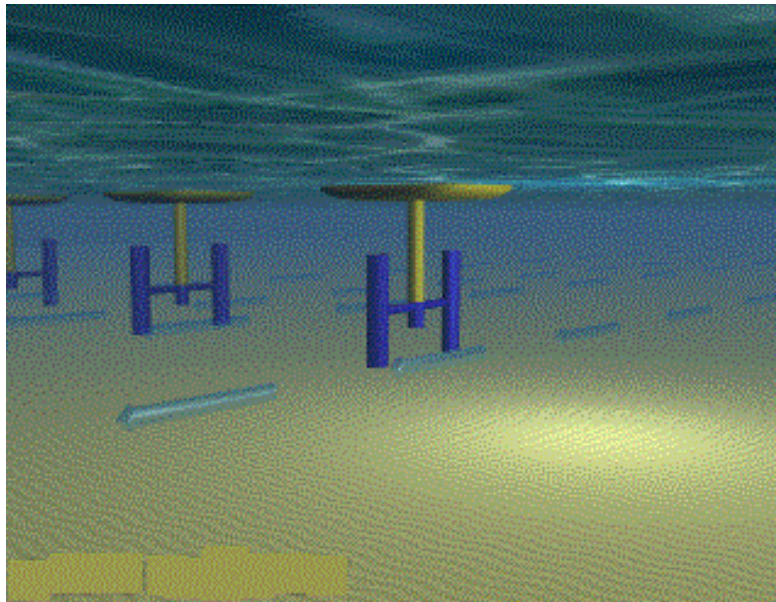
#### 1. Turbine sa horizontalnom osi i sa vertikalnom osi

Turbine sa horizontalnom i vertikalnom osi trenutno koriste lopatice koje su smještene paralelno (horizontalno) ili okomito (vertikalno) u odnosu na smjer toka vode (slika 4.4. i slika 4.5.). Dizajn turbina je sličan vjetroturbinama, ali zbog veće gustoće vode lopatice su manje i okreću se mnogo sporije nego vjetroturbine. Osim toga, one moraju izdržati veće sile i gibanja nego vjetroturbine.





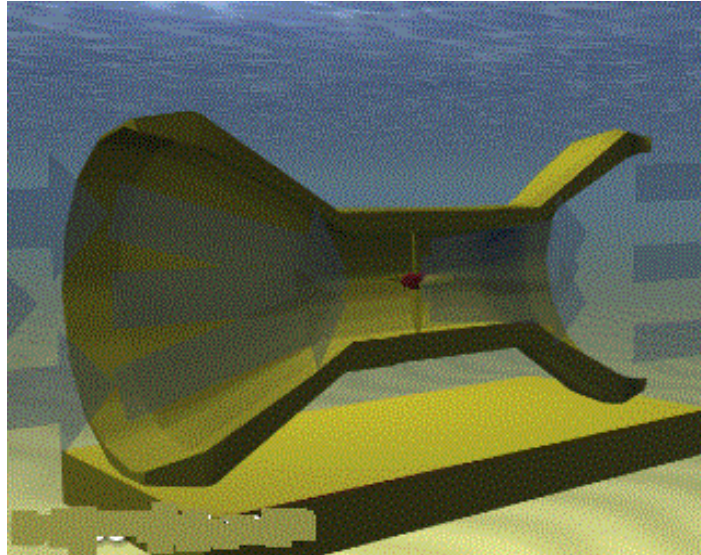
**Sl. 4.4.** *Prikaz turbina sa horizontalnom osi*



**Sl. 4.5.** *Prikaz turbina sa vertikalnom osi*

Većina dizajna koristi lopatice koje su spojene na vratilo centralnog rotora, koje preko mjenjača brzine, je spojeno na osovinu generatora. Turbine sa otvorenim središtem imaju različit dizajn u tome da su lopatice montirane na unutarnju, u središtu otvorenu osovinu smještenu u statičnoj cijevi. Kako voda teče kroz osovinu, ona se rotira i generira se električna energija. Prednost dizajna je ta što eliminira potrebu za mjenjačem brzine.

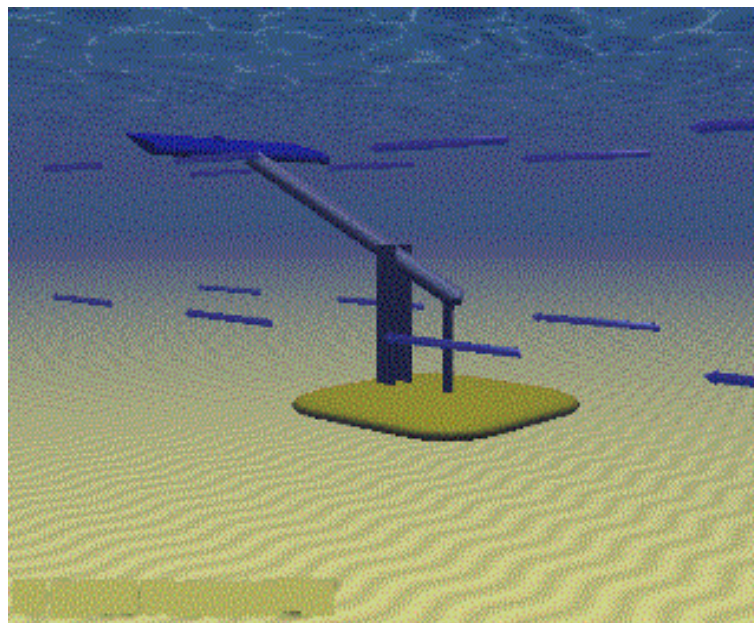
Lopatice horizontalnih i vertikalnih turbina mogu također biti zatvorene unutar kanala. Te turbine se još nazivaju ograđene, zatvorene ili umotane. Zbog zatvorenosti, struja oceana je koncentrirana i usmjerena tako da se protok i izlazna snaga iz turbina povećavaju. Na slici 4.6. je prikazan primjer zatvorene turbine.



**Sl. 4.6.** *Prikaz zatvorene, ograđene ili umotane turbine*

## 2. Izmjenični uređaji

Ovi uređaji imaju lopatice koje se nazivaju nosiva krila-oblikovani kao krila aviona, koja se kreću gore i dolje kako struje plime i oseke teku sa jedne na drugu stranu lopatice. Kretanje gore i dolje nosivih krila se dalje pretvara u rotaciju koja pogoni rotirajuću osovinu, ili je povezan sa klipovima koji podupiru hidraulički sustav za proizvodnju električne energije (slika 4.7.). Prednost izmjeničnih uređaja je ta da dužina lopatice nije ograničena dubinom vode, međutim također zahtijeva kompleksni kontrolni sustav za ispravno postavljanje lopatica.



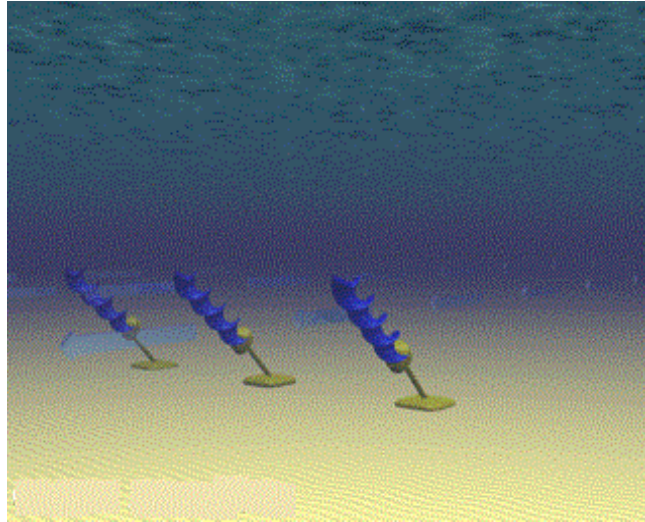
**Sl. 4.7.** *Prikaz tipa izmjeničnog uređaja koji iskorištava plimu i oseku*

## 3. Ostali dizajni



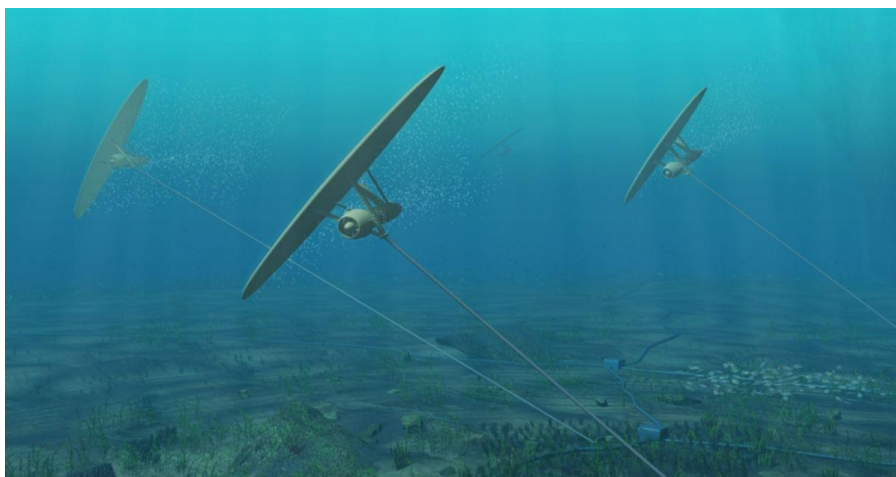
Postoji nekoliko drugih dizajna koje su u fazi istraživanja i razvoja. Ova kategorija uključuje rotirajuće uređaje poput vijka i plimne zmajeve.

Arhimedov vijak je primjer uređaja u obliku vijka koji privlači snagu iz struje plime i oseke na taj način dok voda prolazi kroz spiralu, ona se okreće i tako se pokreće turbina. Na slici 4.8. je prikazan ovaj uređaj.



**Sl. 4.8.** *Prikaz dizajna Arhimedovog vijka*

Plimni zmajevi su uređaji koji su privezani na morsko dno, te nose turbine ispod svojih „krila“. Zmaj leti u struji plime i oseke okrećući se cijelo vrijeme kako bi se povećala brzine vode koja teče kroz turbina. Ovaj koncept je prikazan na slici 4.9..



**Sl. 4.9.** *Prikaz koncepta „plimnog zmaja“*

Osim tehnologija pretvorbe, postoje i drugi dodatni aspekti tehnologija koji određuju učinak i troškove tehnologija za iskorištavanje energije plime i oseke: 1) potporne strukture, 2) oblikovanje polja 3) električni priključci sa obalom.

Sve ove tehnologije zahtijevaju potporne strukture kako bi tehnologija ostala na mjestu unatoč teškim uvjetima u moru. Izbor za temelj ovisi, između ostalog, o poziciji tehnologije u vodi, dubini vode, strukturi morskog dna i dostupnosti brodova i ostalih uređaja koji su potrebni za održavanje konstrukcije. Postoje 3 kategorije potpornih struktura. Prva kategorija su gravitacijske strukture, obično se sastoje od velike mase betona i željeza, povezujući tehnologije sa morskim dnom. Druga kategorija su nagomilane strukture, gdje su jedna ili više greda zabodene u morsko dno. Treća kategorija su tzv. plutajući temelji koji su povezani sa morskim dnom sa krutim ili fleksibilnim žicama ili lancima.

Još jedan tehnološki aspekt za ove tehnologije je njihov razvoj u obliku farmi ili polja.

Pojedinačne jedinice generatora su limitirane u kapacitetu, tako da moraju biti izgrađena polja sa više redova plimnih turbina kako bi se uhvatio puni potencijal struja plime i oseke. Turbine imaju veliki utjecaj na protoke struja, pa tako konfiguracija u kojoj su smještene je kritičan faktor da bi se odredio potencijalni prinos.

Mrežna povezanost za razvoj ovih tehnologija također zahtijeva razmatranje. Turbine moraju biti povezane jedna s drugom preko kablova (obično 33 kV). Polje je tada povezano sa trafostanicom na pučini koje je povezano kabela sa trafostanicom na obali i eventualno sa mrežom.

## 5. UČINKOVITOST PRETVORBE VALNE ENERGIJE U JADRANSKOM MORU, ZA RAZLIČITE VALNE PRETVARAČE

### 5.1 Uvod

U ovom poglavlju će se prikazati i usporediti učinkovitost pretvorbe valne energije na jednoj lokaciji u Jadranskom moru, za tri različita valna pretvarača. Podaci o valu su obezbijeđeni od strane različitih studija izvedenih sa numeričkim valnim modelima ili su bazirani na mjerenjima. Učinkovitost transformacije valne energije u električnu se procjenjuje preko faktora opterećenja (potrošnje) i definirana je kao omjer između električne energije koja je procijenjena da će biti proizvedena svakim specifičnim pretvaračem valne energije i očekivane valne energije s obzirom na promatranu lokaciju. Procjenom ovog indikatora, prikazat će se usporedbe performansi tri različita tipa valnih energetske pretvarača (*Aqua Buoy*, *Pelamis* i *Wave Dragon*). Nominalne snage i neke druge karakteristike uređaja su dane u tablici 1. Za svaki pretvarač proizvođač je dao nominalnu snagu (to je maksimalna snaga koja se može koristiti s tim uređajem) i matricu snage (u kW) . Stanja mora se određuju preko dvije veličine: značajne visine vala  $H_S$  i valnog energetskog perioda  $T_e$ .

**Tab. 5.1.** Usporedba nekih karakteristika različitih valnih pretvarača[49,50,51]

| Uređaj      | Nominalna snaga (kW) | Tip uređaja             |
|-------------|----------------------|-------------------------|
| Pelamis     | 750                  | Podizajući i potopljeni |
| Wave Dragon | 5900                 | Preljevajući            |
| Aqua Buoy   | 250                  | Podizajući              |

Jednadžba kojom se računa prosječna valna energija po metru je:

$$P_w = \frac{\rho g^2}{64\pi} T_e H_S^2 \quad (5-1)$$

gdje je  $P_w$  valni energetski fluks u W/m,  $\rho=1025 \text{ kg/m}^3$  je gustoća morske vode,  $g$  je gravitacijsko ubrzanje.

## 5.2. Procjena valne energije u blizini otoka Palagruže

Na slici 5.1. se može vidjeti prosječna značajna visina valova  $H_S$  u Jadranskom moru po kvadrantima.



Sl. 5.1. Prosječna visina valova u Jadranskom moru[46]

Odmah se može zaključiti kako u Jadranskom moru ne prevladavaju veliki valovi i da su prosječne vrijednosti značajnih visina valova između 0,25 m i 0,7 m. Za analizu u ovom radu je uzeta lokacija blizu otoka Palagruže, sa koordinatama: zemljopisna širina 42.5° sjeverno i zemljopisna dužina 16.5° istočno. Podaci koji su uzeti su bilježeni od rujna 1992. do siječnja 2016.. Podaci su se bilježili svakih 6 sati (znači 4 puta dnevno) [47]. Podaci su preuzeti iz *World Waves* atlasa. *WorldWaves* atlas (WWA) je grupni naziv za niz opsežnih visoko rezolucijski interaktivnih vjetrovnih i valnih atlasa. Pri izradi WWA baze podataka korištena su tri tipa podataka o valovima, a to su: satelitska mjerenja, lokalna mjerenja valografskim plutačama i simulacije primjenom numeričkih modela valova uzburkanoga mora. Podaci koji se nalaze u WWA prikazani su u tablici 2 [48].

**Tab. 5.2.** Parametri dostupni u WWA

| <b>IME</b> | <b>OPIS</b>  |
|------------|--|
| year       | Godina opažanja  |
| mm         | Mjesec opažanja  |
| dd         | Dan opažanja   |
| hh         | Sat opažanja   |
| SWH        | Značajna valna visina                                  |
| PPID       | Vršni period prvog spektra                             |
| MWP        | Srednji valni period                                   |
| SHWW       | Značajna valna visina vjetrovnog vala                  |
| MPWW       | Srednji valni period vjetrovnog vala                   |
| SHPS       | Značajna valna visina mrtvog mora                      |
| MPPS       | Srednji valni period mrtvog mora                       |
| Fro        | Srednji valni kut nailaska $\vartheta$                 |
| Frw        | Srednji valni kut nailaska vjetrovnog vala $\vartheta$ |
| Frs        | Srednji valni kut nailaska mrtvog mora $\vartheta$     |
| WD         | Kut nailaska vjetra $Wdlr$                             |
| WS         | Brzina vjetra $Wsp$                                    |

Za ovu analizu su najbitniji podaci o značajnoj valnoj visini ( $H_s$ ) i vršnom valnom periodu ( $T_p$ ). Tablica 5.3. povezuje značajnu visinu vala  $H_s$  (m) sa vršnim periodom vala  $T_p$  (s) i prikazuje podatke koji su prikupljeni u razdoblju od 1992. do 2016. godine. Npr. valovi između 0,5 m i 1 m se pribrajaju u stupac od 1 m, i tako redom, isto vrijedi i za period. Zbog toga pri računanju prosječne vrijednosti ovih veličina se dobije manje nego kako bi trebalo prema tablici.

**Tab. 5.3.** Podaci o značajnoj visini valova i vršnom periodu u razdoblju od rujna 1992. do siječnja 2016. za lokaciju u blizini otoka Palagruže [47]

| $T_p/H_s$   | 0,5  | 1     | 1,5  | 2    | 2,5  | 3   | 3,5 | 4  | 4,5 | 5  | 5,5 | 6 | 6,5 | Suma  |
|-------------|------|-------|------|------|------|-----|-----|----|-----|----|-----|---|-----|-------|
| 1           | 0    | 0     | 0    | 0    | 0    | 0   | 0   | 0  | 0   | 0  | 0   | 0 | 0   | 0     |
| 2           | 0    | 0     | 0    | 0    | 0    | 0   | 0   | 0  | 0   | 0  | 0   | 0 | 0   | 0     |
| 3           | 4934 | 1666  | 14   | 0    | 0    | 0   | 0   | 0  | 0   | 0  | 0   | 0 | 0   | 6614  |
| 4           | 3552 | 6815  | 861  | 20   | 0    | 0   | 0   | 0  | 0   | 0  | 0   | 0 | 0   | 11248 |
| 5           | 589  | 3800  | 2616 | 666  | 36   | 0   | 0   | 0  | 0   | 0  | 0   | 0 | 0   | 7707  |
| 6           | 260  | 1114  | 1533 | 1256 | 500  | 113 | 5   | 0  | 0   | 0  | 0   | 0 | 0   | 4781  |
| 7           | 166  | 326   | 459  | 445  | 393  | 255 | 70  | 14 | 3   | 0  | 0   | 0 | 0   | 2131  |
| 8           | 93   | 103   | 138  | 159  | 128  | 111 | 91  | 51 | 21  | 7  | 1   | 0 | 0   | 903   |
| 9           | 28   | 68    | 36   | 44   | 54   | 38  | 38  | 22 | 12  | 5  | 1   | 1 | 1   | 348   |
| 10          | 11   | 29    | 14   | 10   | 13   | 11  | 10  | 7  | 2   | 1  | 4   | 1 | 0   | 113   |
| 11          | 4    | 8     | 4    | 2    | 0    | 1   | 0   | 0  | 0   | 0  | 0   | 0 | 0   | 19    |
| 12          | 8    | 3     | 4    | 1    | 0    | 0   | 0   | 0  | 0   | 0  | 0   | 0 | 0   | 16    |
| 13          | 14   | 0     | 1    | 0    | 0    | 0   | 0   | 0  | 0   | 0  | 0   | 0 | 0   | 15    |
| 14          | 4    | 1     | 0    | 0    | 0    | 0   | 0   | 0  | 0   | 0  | 0   | 0 | 0   | 5     |
| <b>Suma</b> | 9663 | 13933 | 5680 | 2603 | 1124 | 529 | 214 | 94 | 38  | 13 | 6   | 2 | 1   | 33900 |

Iz tablice se vidi da je ukupan broj mjerenja za ovo razdoblje 33900, te da je skoro 70 % značajne visine valova manje od 1 m. Prosječna značajna visina valova je 0,87 m, a prosječni vršni valni period je 3,9 sekundi. Energetski period se računa prema formuli:

$$T_e = 0,9 * T_c = 3,51 s \quad (5-2)$$

Zatim slijedi da prema jednadžbi (5-1) prosječna vrijednost valne energije po metru u točki mjerenja za period od 1992. do 2016. iznosi:  $P_w=1,3$  kW/m

Prosječna očekivana električna snaga pojedinog pretvarača na nekoj lokaciji se računa pomoću matrice snage pojedinog valnog pretvarača i preko podataka iz tablice 5.3..Matrice snaga se nalaze na slikama 5.2., 5.3., 5.4., redom za *Pelamis*, *Aqua Buoy* i *Wave Dragon*.



|       |     | Tp(s) |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------|-----|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|       |     | 5.0   | 5.5  | 6.0  | 6.5  | 7.0  | 7.5  | 8.0  | 8.5  | 9.0  | 9.5  | 10.0 | 10.5 | 11.0 | 11.5 | 12.0 | 12.5 | 13.0 |
| Hs(m) | 0.5 | idle  | idle | idle | idle | idle | idle | idle | idle | idle | idle | idle | idle | idle | idle | idle | idle | idle |
|       | 1.0 | idle  | 22   | 29   | 34   | 37   | 38   | 38   | 37   | 35   | 32   | 29   | 26   | 23   | 21   | idle | idle | idle |
|       | 1.5 | 32    | 50   | 65   | 76   | 83   | 86   | 86   | 83   | 78   | 72   | 65   | 59   | 53   | 47   | 42   | 37   | 33   |
|       | 2.0 | 57    | 88   | 115  | 136  | 148  | 153  | 152  | 147  | 138  | 127  | 116  | 104  | 93   | 83   | 74   | 66   | 59   |
|       | 2.5 | 89    | 138  | 180  | 212  | 231  | 238  | 238  | 230  | 216  | 199  | 181  | 163  | 146  | 130  | 116  | 103  | 92   |
|       | 3.0 | 129   | 198  | 260  | 305  | 332  | 340  | 332  | 315  | 292  | 266  | 240  | 219  | 210  | 188  | 167  | 149  | 132  |
|       | 3.5 | -     | 270  | 354  | 415  | 438  | 440  | 424  | 404  | 377  | 362  | 326  | 292  | 260  | 230  | 215  | 202  | 180  |
|       | 4.0 | -     | -    | 462  | 502  | 540  | 546  | 530  | 499  | 475  | 429  | 384  | 366  | 339  | 301  | 267  | 237  | 213  |
|       | 4.5 | -     | -    | 544  | 635  | 642  | 648  | 628  | 590  | 562  | 528  | 473  | 432  | 382  | 356  | 338  | 300  | 266  |
|       | 5.0 | -     | -    | -    | 739  | 726  | 731  | 707  | 687  | 670  | 607  | 557  | 521  | 472  | 417  | 369  | 348  | 328  |
|       | 5.5 | -     | -    | -    | 750  | 750  | 750  | 750  | 750  | 737  | 667  | 658  | 586  | 530  | 496  | 446  | 395  | 355  |
|       | 6.0 | -     | -    | -    | -    | 750  | 750  | 750  | 750  | 750  | 750  | 711  | 633  | 619  | 558  | 512  | 470  | 415  |
|       | 6.5 | -     | -    | -    | -    | 750  | 750  | 750  | 750  | 750  | 750  | 750  | 743  | 658  | 621  | 579  | 512  | 481  |
|       | 7.0 | -     | -    | -    | -    | -    | 750  | 750  | 750  | 750  | 750  | 750  | 750  | 750  | 676  | 613  | 584  | 525  |
|       | 7.5 | -     | -    | -    | -    | -    | 750  | 750  | 750  | 750  | 750  | 750  | 750  | 750  | 750  | 686  | 622  | 593  |
|       | 8.0 | -     | -    | -    | -    | -    | -    | -    | 750  | 750  | 750  | 750  | 750  | 750  | 750  | 750  | 690  | 625  |

Sl. 5.2. Matrica snage za valni pretvarača Pelamis [49]

|        |     | Te (s) |    |    |     |     |     |     |     |     |     |     |     |    |  |  |  |
|--------|-----|--------|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|--|--|--|
|        |     | 5      | 6  | 7  | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  | 15  | 16  | 17 |  |  |  |
| Hs (m) | 1   | 0      | 0  | 8  | 11  | 12  | 11  | 10  | 8   | 7   | 0   | 0   | 0   | 0  |  |  |  |
|        | 1.5 | 0      | 13 | 17 | 25  | 27  | 26  | 23  | 19  | 15  | 12  | 12  | 12  | 7  |  |  |  |
|        | 2   | 0      | 24 | 30 | 44  | 49  | 47  | 41  | 34  | 28  | 23  | 23  | 23  | 12 |  |  |  |
|        | 2.5 | 0      | 37 | 47 | 69  | 77  | 73  | 64  | 54  | 43  | 36  | 36  | 36  | 19 |  |  |  |
|        | 3   | 0      | 54 | 68 | 99  | 111 | 106 | 92  | 77  | 63  | 51  | 51  | 51  | 27 |  |  |  |
|        | 3.5 | 0      | 0  | 93 | 135 | 152 | 144 | 126 | 105 | 86  | 70  | 70  | 70  | 38 |  |  |  |
|        | 4   | 0      | 0  | 0  | 122 | 176 | 198 | 188 | 164 | 137 | 112 | 91  | 91  | 49 |  |  |  |
|        | 4.5 | 0      | 0  | 0  | 223 | 250 | 239 | 208 | 174 | 142 | 115 | 115 | 115 | 62 |  |  |  |
|        | 5   | 0      | 0  | 0  | 250 | 250 | 250 | 250 | 214 | 175 | 142 | 142 | 142 | 77 |  |  |  |
|        | 5.5 | 0      | 0  | 0  | 250 | 250 | 250 | 250 | 250 | 211 | 172 | 172 | 172 | 92 |  |  |  |

Sl. 5.3. Matrica snage za valni pretvarač Aqua Buoy [50]

|       |     | Te (s) |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------|-----|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|       |     | 4.0    | 4.5  | 5    | 5.5  | 6.0  | 6.5  | 7.0  | 7.5  | 8.0  | 8.5  | 9.0  | 9.5  | 10.0 | 10.5 | 11.0 | 11.5 | 12.0 | 12.5 | 13.0 | 13.5 | 14.0 |
| Hs(m) | 0.5 | 0      | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
|       | 1   | 203    | 276  | 348  | 432  | 516  | 608  | 699  | 798  | 896  | 925  | 953  | 958  | 962  | 941  | 919  | 870  | 820  | 742  | 663  | 555  | 446  |
|       | 1.5 | 412    | 448  | 485  | 617  | 750  | 899  | 1049 | 1212 | 1375 | 1433 | 1491 | 1509 | 1527 | 1502 | 1477 | 1404 | 1332 | 1209 | 1086 | 912  | 737  |
|       | 2   | 621    | 621  | 621  | 802  | 983  | 1191 | 1398 | 1626 | 1853 | 1941 | 2029 | 2061 | 2092 | 2063 | 2034 | 1939 | 1844 | 1677 | 1509 | 1269 | 1028 |
|       | 2.5 | 1123   | 1123 | 1123 | 1213 | 1304 | 1609 | 1914 | 2258 | 2602 | 2752 | 2903 | 2972 | 3041 | 3017 | 2993 | 2868 | 2743 | 2504 | 2266 | 1910 | 1555 |
|       | 3   | 1624   | 1624 | 1624 | 1624 | 1624 | 2027 | 2430 | 2890 | 3350 | 3563 | 3776 | 3883 | 3989 | 3970 | 3951 | 3796 | 3641 | 3332 | 3022 | 2552 | 2082 |
|       | 3.5 | 2581   | 2581 | 2581 | 2581 | 2581 | 2783 | 2984 | 3588 | 4191 | 4494 | 4796 | 4870 | 4945 | 4935 | 4926 | 4845 | 4765 | 4374 | 3983 | 3372 | 2761 |
|       | 4   | 3538   | 3538 | 3538 | 3538 | 3538 | 3538 | 3538 | 4285 | 5032 | 5424 | 5816 | 5858 | 5900 | 5900 | 5900 | 5895 | 5889 | 5416 | 4943 | 4191 | 3439 |
|       | 4.5 | 4719   | 4719 | 4719 | 4719 | 4719 | 4719 | 4719 | 5093 | 5466 | 5662 | 5858 | 5879 | 5900 | 5900 | 5900 | 5897 | 5895 | 5658 | 5422 | 4822 | 4222 |
|       | 5   | 5900   | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 |
|       | 5.5 | 5900   | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 |
|       | 6   | 5900   | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 |
|       | 6.5 | 5900   | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 |
|       | 7   | 5900   | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 |
|       | 7.5 | 5900   | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 |
|       | 8   | 5900   | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 | 5900 |

Sl. 5.4. Matrica snage za valni pretvarač Wave Dragon [51]

Valni modeli daju teorijsku valnu energije u ovisnosti o stanju mora, ali stvarna energija ovisi o pojedinom valnom pretvaraču. Svaka tehnologija ima drugačije raspone i također drugačije učinkovitosti za različita stanja mora. Što su vrijednosti  $H_s$  i  $T_e$  bliže vrijednosti za koje pojedini

pretvarač pruža maksimalnu učinkovitost, i ako se glavnina pojava događa u tom rasponu, to je valni pretvarač učinkovitiji. Proizvođači valnih pretvarača daju podatke o performansama kao funkcije od  $H_s$  i valnog perioda, koji može biti energetski period  $T_e$  ili neki drugi kao: vršni period  $T_p$  ili period nultog prijelaza  $T_z$ . Matrica snage pruža očekivanu izlaznu snagu za svaku značajnu valnu visinu i valni period. Jedan par značajne valne visine i valnog perioda se naziva energetski „spremnik“.

Kada povežemo tablicu 5.3. sa matricama snaga, može se vidjeti da bi valni pretvarač *Pelamis* samo 3 puta dao maksimalnu izlaznu snagu od 33900 mjerenja, a čak 22843 puta je izlazna snaga 0 (67%). Prosječna očekivana izlazna snaga za uređaj *Pelamis* na ovoj lokaciji je 32,3 kW. Valni pretvarač *Aqua Buoy* bi u 34 mjerenja postigao maksimalnu izlaznu snagu, a čak 26157 puta bi izlazna snaga bila 0, i stoga je prosječna očekivana izlazna snaga za *Aqua Buoy* 6,87 kW. Valni pretvarač *Wave Dragon* ima prosječnu očekivanu izlaznu snagu 437,4 kW.

U tablici 5.4. su prikazane prosječne očekivane vrijednosti izlaznih snaga za sva 3 valna pretvarača.

**Tab. 5.4.** Očekivane prosječne vrijednosti izlaznih snaga za valne pretvarače *Pelamis*, *Aqua Buoy* i *Wave Dragon* na navedom mjestu mjerenja

| Tip pretvarača | Pelamis | Aqua Buoy | Wave Dragon |
|----------------|---------|-----------|-------------|
| $P_e$ (kW)     | 32,3    | 6,87      | 437,4       |

Osim očekivanih vrijednosti električne snage, još jedan indikator učinkovitosti transformacije valne energije u električnu je također procijenjen. To je faktor opterećenja koji se računa kao:

$$I_L = 100 \cdot \frac{P_E}{P_{nom}} \quad (5-3)$$

Za ista tri uređaja prosječne vrijednosti ovog indikatora prikazane su u tablici 5.5..

**Tab. 5.5.** Prosječne vrijednosti faktora opterećenja za valne pretvarače *Pelamis*, *Aqua Buoy* i *Wave Dragon*

| Tip pretvarača | Pelamis | Aqua Buoy | Wave Dragon |
|----------------|---------|-----------|-------------|
| $I_L$          | 4,61    | 2,75      | 7,41        |

Na osnovu ove analize se može zaključiti kako blizina otoka Palagruže ipak nije još uvijek pogodna za učinkovito iskorištavanje energije valova. To isto vrijedi i za cijelo Jadransko more, budući da su uvjeti slični.

## 6.ZAKLJUČAK

Važan pokretač za valnu energiju je njezin ogroman potencijal diljem svijeta, relativno nikakav utjecaj na okoliš, čak i u usporedbi sa ostalim tehnologijama obnovljivih izvora, i njezin mali vizualni utjecaj na obalu. Sve ovo dovodi do potpore i vlada i privatnog sektora i rezultira velikim brojem prototipa koji su trenutno u fazi demonstracije. Tehnološki sektor također prati industriju koja se bavi pretvorbom energije morskih struja sa priličnim brojem uređaja koji su blizu komercijalizacije i sa nekoliko valnih farma (razine oko 10 MW). Ali još se nije pojavio neki dominantni dizajn i stoga su anagžmani velikih inženjerskih tvrtki i poduzeća još uvijek u fazi razvoja.

Osim tehnološkog izazova, valna energija se susreće sa sličnim preprekama kao i vjetroenergija na moru i energija plime i oseke, a to su: nesigurnost u pogledu odredbi i utjecaja na okoliš, potreba za ulaganjima uzimajući u obzir tekuće i predviđene troškove, potrebno je tržište koje privlači privatne ulagače, nedovoljna infrastruktura: mrežna povezanost na moru je veoma skupa, planiranje i licenciranje proizvođača (veliki administrativni troškovi).

Prikladna mrežna infrastruktura i povezanost su ključne za daljnji razvoj i potrebno je omogućiti tvrtkama održavanje infrastrukture. Valne farme smještene u dubokim vodama i daleko od obale će zahtijevati specijalizirane podstanice za povezivanje nizova podvodnih i dugačkih mreža.

Jedan pristup za savladavanje ovih prepreka je razvoj integrirane morske mrežne infrastrukture, kao što je slučaj sa vjetroenergijom u Sjevernom moru. Uzimajući u obzir potrebe energije valova, kao i energije vjetra, razvijanje zajedničkih projekata može biti učinkovitije. Troškovi mogu biti podijeljeni, te vjetar i valovi mogu biti komplementarni, ako velike brzine vjetra ugase turbinu, ali dozvole tehnologijama valne energije da nastave raditi. Također troškovi se mogu smanjiti ako se valni pretvarači premjeste na obalu, u posebne luke, te tu također budu uključeni u zajedničko funkcioniranje sa npr. vjetroparkom na obali.

Što se tiče zatvorenih mora kao što je Jadransko more, sa malim valovima, ona još uvijek nisu pogodna i isplativa za komercijalno iskorištavanje energije valova. U budućnosti bi se možda moglo i to promijeniti, ako se poboljšaju postojeće ili stvore nove tehnologije pretvarača sa prilagodljivijim matricama snage za ovakve uvjete, gdje bi onda učinkovitost se povećala. U sadašnjosti su valni pretvarači ipak dizajnirani za oceanske uvjete, gdje su valovi mnogo jači i valni periodi veći.

## LITERATURA

- [1] J. Lighthill, "Waves in Fluids", Cambridge: Cambridge University Press, 1978
- [2] Holthuijsen, L.H. "Waves in Oceanic and Coastal Waters", Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [3] McCormick ME. Ocean wave energy conversion. New York: Wiley; 1981.
- [4] Ross D. Power from sea waves. Oxford: Oxford University Press, 1995.
- [5] Masuda Y. Wave-activated generator. Int. Colloq Exposition Oceans, Bordeaux, France; 1971.
- [6] Masuda Y. Experimental full-scale results of wave power machine Kaimei in 1978. In: Proc First Symp Wave Energy Utilization, Gothenburg, Sweden; 1979, stranice 349-63.
- [7] Salter SH. Wave power. Nature 1974;249:720-4.
- [8] Grove-Palmer COJ. Wave energy in the United Kingdom: a review of the programme June 1975 to March 1982. In: Proc 2 nd Int Symp Wave Energy Utilization, Trondheim, Norway; 1982, stranice 23-54
- [9] Whittaker TJT, McIlwaine SJ, Raghunathan S. A review of the Islay shoreline wave power station. In: Proc First European Wave Energy Symp, Edinburgh; 1993, stranice 283-6.
- [10] Drew B, Plummer AR, Sahinkaya MN. A review of wave energy converter technology. Proc Inst Mech Eng Part A-J Power Energy 2010;223:887-902
- [11] Dostupno na: <https://www.ipcc.ch/>
- [12] Lewis, A., S. Estefen, J. Huckerby, W. Musial, T. Pontes, J. Torres-Martinez, 2011: Ocean Energy. In IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation [O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, C. von Stechow (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- [13] Wells AA. Fluid driven rotary transducer. British Patent Spec No. 1595700; 1976.

- [14] Babinsten IA. Apparatus for converting sea wave energy into electrical energy. U.S. patent No. 3922739; 1975.
- [15] Moody, GW. The NEL oscillating water column: Recent developments. In: First Symp Wave Energy Utilization, Gothenburg, 1979, stranice 283-97.
- [16] Falcão AF de O. The shoreline OWC wave power plant at the Azores. In: Proc 4th European Wave Energy Conf, Aalborg, Denmark; 2000, stranice 42-7.
- [17] Heath T, Whittaker TJT, Boake CB. The design, construction and operation of the LIMPET wave energy converter (Islay, Scotland). In: Proc 4th European Wave Energy Conf, Aalborg, Denmark; 2000, stranice 49-55.
- [18] Zhang D, Li W, Lin Y. Wave energy in China: Current status and perspectives. Renewable Energy 2009;34:2089-92.
- [19] Alcorn R, Hunter S, Signorelli C, Obeyesekera R, Finnigan T, Denniss T. Results of the testing of the Energetech wave energy plant at Port Kembla. Energeth Report; 2005. Dostupno na: [http://energetech.com.au:8080/attachments/Results\\_PK\\_Wave\\_Energy\\_Trial.pdf](http://energetech.com.au:8080/attachments/Results_PK_Wave_Energy_Trial.pdf)
- [20] Dostupno na: <https://report2014.ocean-energy-systems.org/country-reports/republic-of-korea/technology-demonstration/>
- [21] Masuda Y, McCormick ME. Experiences in pneumatic wave energy conversion in Japan. In: McCormick ME, Kim YC, editors. Utilization of ocean waves – wave to energy conversion. New York: ASCE, 1987, stranice 1-33.
- [22] Washio Y, Osawa H, Nagata Y, Fujii F, Furuyama H, Fujita T. The offshore floating type wave power device “Mighty Whale”: open sea tests. In: Proc 10th Int Offshore Polar Eng Conf, Seattle; 2000, vol.1, stranice 373-80.
- [23] McCormick ME. Analysis of a wave-energy conversion buoy. AIAA J Hydraulics 1974;8:77-82
- [24] Dostupno na: <http://www.leancon.com/>
- [25] Nielsen K, Smed PF. Point absorber – optimization and survival testing. In: Proc 3rd European Wave Energy Conf, Patras, Greece; 1998, stranice 207-14.

- [26] Waters R, Stalberg M, Danielsson O, Svensson O, Gustafsson S, Stromstedt E et al. Experimental results from sea trials of an offshore wave energy system. *Appl Phys Let* 90(3); Art No. 034105.
- [27] Elwood D, Schacher A, Rhinefrank K, Prudell J, Yim S, Amon E et al. Numerical modelling and ocean testing of a direct-drive wave energy device utilizing a permanent magnet linear generator for power take-off. In: *Proc 28th Int Conf Ocean Offshore Arctic Eng, ASME, Honolulu, Hawaii; 2009, Paper No. OMAE2009-79146*
- [28] Cleason L, Forsberg J, Rylander A, Sjöström BO. Contribution to the theory and experience of energy production and transmission from the buoy-concept. In: *Proc 2 nd Int Symp Wave Energy Utilization, Trondheim, Norway; 1982, stranice 345-70.*
- [29] Payne GS, Taylor JRM, Bruce T, Parkin P. Assessment of boundary-element method for modelling a free-floating sloped wave energy device. Part 2: Experimental validation. *Ocean Eng* 2008;35:342-57.
- [30] Weber J, Mouwen F, Parrish A, Robertson D. Wavebob – research & development network and tools in the context of systems engineering. In: *Proc 8th European Wave Tidal Energy Conf, Uppsala, Sweden; 2009, stranice 416-20.*
- [31] Dostupno na: <https://www.oceanpowertechnologies.com/powerbuoy>
- [32] Prado M. Archimedes wave swing (AWS). In: Cruz J, editor. *Ocean wave energy*. Berlin: Springer; 2008, stranice 297-304.
- [33] Gardner FE. Learning experience of AWS pilot plant test offshore Portugal. In: *Proc 6th European Wave Energy Conf, Glasgow; 2005, stranice 149-54.*
- [34] Dostupno na: <https://www.carnegiece.com/>
- [35] Pizer DJ, Retzler C, Henderson RM, Cowieson FL, Shaw MG, Dickens B, Hart, R. Pelamis WEC – recent advances in the numerical and experimental modelling programme. In: *Proc. 6th European Wave Tidal Energy Conf., Glasgow; 2005, stranice 373-8.*
- [36] McCormick ME, Murthagh J, McCabe P. Large-scale experimental study of a hinged-barge wave energy conversion system. In: *3rd European Wave Energy Conf, Patras, Greece; 1998, stranice 215-22.*

- [37] Babarit A, Clement AH, Gilloteaux JC. Optimization and time-domain simulation of the SEAREV wave energy converter. In: Proc 24th Int Conf Offshore Mechanics Arctic Eng, Halkidiki, Greece; 2005, vol 2, stranice 703-12.
- [38] Watabe T. Pendulum wave power converter: Fifteen years study and future prospect. In: Proc Int Symp Ocean Energy develop, Muroran, Japan, 1993, stranice 41-52.
- [39] Whittaker T, Collier D, Folley M, Osterried M, Henry A, Crowley M. The development of Oyster – a shallow water surging wave energy converter. In: Proc 7th European Wave Tidal Energy Conf, Porto, Portugal; 2007.
- [40] WaveRoller. Dostupno na: <http://www.awenergy.com/index.php/waveroller.html>
- [41] Wave Star Energy. Dostupno na: <http://www.wavestarenergy.com/>
- [42] Estefen SF, Esperança PTT, Ricarte E, Costa PR, Pinheiro MM, Clemente CH et al. Experimental and numerical studies of the wave energy hyperbaric device for electricity production. In: Proc 27th Int Conf Offshore Mechanics Arctic Eng, Estoril, Portugal; 2008, paper No. OMAE2008-57891.
- [43] Kofoed JP, Frigaard P, Friis-Madsen E, Sørensen HC. Prototype testing of the wave energy converter Wave Dragon. *Renewable Energy* 2006;31:181-9.
- [44] Margheritini L, Vicinanza D, Frigaard P. Hydraulic characteristics of seawave slot-cone generator pilot plant at Kvitvøy (Norway). In: Proc 7th European Wave Tidal Energy Conf, Porto, Portugal; 2007.
- [45] IRENA Ocean Energy Technology Brief 3, June 2014, dostupno na: [www.irena.org](http://www.irena.org)
- [46] M. Katalinić M. Ćorak & J. Parunov, Analysis of wave heights and wind speeds in the Adriatic Sea, 2015
- [47] A. Farkas, J. Parunov, M. Katalinić, Wave Statistics for the Middle Adriatic Sea, 2016.
- [48] Barstow S. et al. (2003): WorldWaves: Fusion of data from many sources in a userfriendly software package for timely calculation of wave statistics in global coastal waters, The Thirteenth International Offshore and Polar Engineering Conference. International Society of Offshore and Polar Engineers
- [49] Pelamis brochure, dostupno na: <http://ctp.lns.mit.edu/energy/files/pelamisbrochure.pdf>



[50] E.Rusu, F.Onea, A review of the technologies for wave energy extraction,2018.

[51] Dostupno na: <http://www.wavedragon.net>

## **SAŽETAK**

U svijetu postoji ogroman potencijal za iskorištavanje energije valova i morskih struja. U skladu s time u posljednje vrijeme se pojavljuje sve više novih tehnologija za iskorištavanje te energije. U diplomskom radu je prikazana podjela tehnologija za iskorištavanje energije valova, te energije plime i oseke. Za svaki tip pojedine tehnologije je navedeno jedan ili više primjera. Na kraju je izvršena usporedba učinkovitosti različitih tipova tehnologija valnih pretvarača

Ključne riječi: val, pretvarač, energija, ocean

## **ABSTRACT**

Worldwide, there is enormous potential for extraction of wave energy and sea currents energy. According to that, more and more new technologies are develop in recent times to exploit this energy. In this paper is presented the division of technology for energy utilization of the wave and the energy of tides. For each part of particular technology one or more examples are mentioned. In the end, a comparison of the efficiency of different types of wave converters was performed.

Key words: wave, converter, energy, ocean

## **ŽIVOTOPIS**

Josip Maskaljević je rođen 10. studenog 1993. godine u Vinkovcima. Osnovnu školu Ruđera Boškovića u Donjoj Mahali kod Orašja završava 2008. godine. Iste godine upisuje smjer opća gimnazija u Srednjoj školi fra Martina Nedića u Orašju, gdje maturira 2012. godine. Nakon srednje škole upisuje Elektrotehnički fakultet u Osijeku. 2015. godine završava preddiplomski studij elektroenergetike i stječe akademski stupanj prvostupnika inženjera elektrotehnike. Te godine upisuje i Diplomski studij elektroenergetike, smjer Održiva elektroenergetika.