

# Pregled tehnologija za iskorištavanje morskih valova i mogućnost njihove primjene u Republici Hrvatskoj

---

**Manzoni, Antonia**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2023**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies, Rijeka / Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:187:120596>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-07**



**Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet**  
University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies - FMSRI Repository](#)



**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
POMORSKI FAKULTET**

**ANTONIA MANZONI**

**PREGLED TEHNOLOGIJA ZA ISKORIŠTAVANJE MORSKIH  
VALOVA I MOGUĆNOST NJIHOVE PRIMJENE U REPUBLICI  
HRVATSKOJ**

**DIPLOMSKI RAD**

Rijeka, 2023.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
POMORSKI FAKULTET**

**PREGLED TEHNOLOGIJA ZA ISKORIŠTAVANJE MORSKIH  
VALOVA I MOGUĆNOST NJIHOVE PRIMJENE U REPUBLICI  
HRVATSKOJ**

**OVERVIEW OF TECHNOLOGIES FOR THE EXPLOITATION OF SEA  
WAVES AND THE POSSIBILITY OF THEIR APPLICATION IN THE  
REPUBLIC OF CROATIA**

**DIPLOMSKI RAD**

Kolegij: Morske tehnologije

Mentor/komentor: izv.prof.dr.sc. Lovro Maglić

Student/studentica: Antonia Manzoni

Studijski smjer: Logistika i menadžment u pomorstvu i prometu

JMBAG: 0112078037

Rijeka, rujan 2023.

Student/studentica: Antonia Manzoni

Studijski program: Logistika i menadžment u pomorstvu i prometu

JMBAG: 0112078037

## IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADI DIPLOMSKOG RADA

Kojom izjavljujem da sam diplomski rad s naslovom  
Pregled tehnologija za iskorištavanje morskih valova i mogućnost njihove primjene u Republici Hrvatskoj  
(naslov diplomskog rada)

izradio/la samostalno pod mentorstvom  
izv.prof.dr.sc. Lovro Maglić  
(prof. dr. sc. / izv. prof. dr. sc. / doc dr. sc Ime i Prezime)

te komentorstvom \_\_\_\_\_

stručnjaka/stručnjakinje iz tvrtke \_\_\_\_\_  
(naziv tvrtke).

U radu sam primijenio/la metodologiju izrade stručnog/znanstvenog rada i koristio/la literaturu koja je navedena na kraju diplomskog rada. Tuđe spoznaje, stavove, zaključke, teorije i zakonitosti koje sam izravno ili parafrazirajući naveo/la u diplomskom radu na uobičajen, standardan način citirao/la sam i povezao/la s fusnotama i korištenim bibliografskim jedinicama, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Rad je pisan u duhu hrvatskoga jezika.

Student/studentica  
Antonia Manzoni  
(potpis)



Student/studentica: Antonia Manzoni

Studijski program: Logistika i menadžment u pomorstvu i prometu

JMBAG: 0112078037

IZJAVA STUDENTA – AUTORA  
O JAVNOJ OBJAVI OBRANJENOG DIPLOMSKOG RADA

Izjavljujem da kao student – autor diplomskog rada dozvoljavam Pomorskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci da ga trajno javno objavi i besplatno učini dostupnim javnosti u cjelovitom tekstu u mrežnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta.

U svrhu podržavanja otvorenog pristupa diplomskim radovima trajno objavljenim u javno dostupnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta, ovom izjavom dajem neisključivo imovinsko pravo iskorištavanja bez sadržajnog, vremenskog i prostornog ograničenja mog diplomskog rada kao autorskog djela pod uvjetima *Creative Commons* licencije CC BY Imenovanje, prema opisu dostupnom na <http://creativecommons.org/licenses/>

Student/studentica - autor  
Antonia Manzoni  
(potpis)



## SAŽETAK

Povijest uređaja za iskorištavanje energije valova obilježena je napretkom, izazovima i istraživanjima koja su u tijeku. Iako je komercijalna implementacija ograničena, potraga za načinom iskorištavanja energije valova ostaje aktivno područje, s ciljem razvoja održivih i pouzdanih rješenja za obnovljivu energiju iz snage valova. U radu je dan pregled tehnologija iskorištavanja energije valova s naglaskom na mogućnosti primjene u Republici Hrvatskoj. Rad započinje opisom osnovnih značajki energije valova i njihove upotrebe u svijetu. Nadalje su u radu opisane tehnologije uzimajući u obzir ključna pitanja njihovih prednosti, nedostataka i ograničenja. Metodologija istraživanja uključuje pregled literature, analizu podataka i studija slučaja postojećih projekata. Za lokaciju u blizini otoka Palagruže napravljena je analiza i usporedba uređaja Archimedes Waveswing, AquaBuoy i Wave Dragon. Rad također istražuje potencijalnu mogućnost umrežavanja s postojećim objektima kako bi se povećala učinkovitost i smanjili troškovi rada.

Ključne riječi: energija valova, pretvarači energije valova

## SUMMARY

The history of wave energy devices is marked by progress, challenges, and ongoing research. Although commercial implementation is limited, the search for a way to harness wave energy remains an active field, with the aim of developing sustainable and reliable solutions for renewable energy from wave power. The thesis presents an overview of technologies for the use of marine energy with an emphasis on possibilities of application in the Republic of Croatia. The paper begins with a description of the basic characteristics of wave energy and its use in the world. Furthermore, the paper describes the technologies in terms of the direction of the incident wave and the mode of operation, considering the key issues of their strengths, weaknesses, and limitations. Research methodology includes literature review, data analysis and case studies of existing projects. An analysis and comparison of Archimedes Waveswing, AquaBuoy and wave Dragon was made for a location near the island of Palagruza. The work also explores the potential for networking with existing facilities to increase efficiency and reduce operating costs.

Keywords: wave energy, wave energy converters (WEC)

# SADRŽAJ

<b>SAŽETAK .....</b>	<b>II</b>
<b>SUMMARY .....</b>	<b>II</b>
<b>SADRŽAJ .....</b>	<b>III</b>
<b>1. UVOD.....</b>	<b>1</b>
1.1. PROBLEM, PREDMET I OBJEKTI ISTRAŽIVANJA.....	1
1.2. RADNA HIPOTEZA .....	1
1.3. SVRHA I CILJEVI ISTRAŽIVANJA .....	1
1.4. ZNANSTVENE METODE .....	2
1.5. STRUKTURA RADA.....	2
<b>2. OSNOVNE ZNAČAJKE ENERGIJE VALOVA .....</b>	<b>4</b>
2.1. OPĆENITO O MORSKIM VALOVIMA.....	4
2.2. POHRANA ENERGIJE I INTEGRACIJA ENERGIJE U MREŽU.....	8
2.3. UPOTREBA ENERGIJE VALOVA U SVIJETU .....	11
2.4. RAZVOJ ENERGIJE VALOVA NA PODRUČJU EU .....	14
2.5. RAZVOJNI PROCES SUSTAVA ZA ISKORIŠTENJE ENERGIJE VALOVA .....	16
2.6. PROCJENA EKONOMSKE ISPLATIVOSTI INTEGRACIJE WEC UREĐAJA .....	18
<b>3. TEHNOLOGIJE ISKORIŠTAVANJA ENERGIJE VALOVA.....</b>	<b>20</b>
3.1. PODJELA TEHNOLOGIJA ZA ISKORIŠTAVANJE ENERGIJE VALOVA .....	22
3.1.1. <i>Sustavi neovisni o smjeru vala.....</i>	<i>23</i>
3.1.2. <i>Sustavi ovisni o smjeru vala.....</i>	<i>32</i>
<b>4. MOGUĆNOSTI ISKORIŠTAVANJA ENERGIJE VALOVA NA PODRUČJU REPUBLIKE HRVATSKE.....</b>	<b>39</b>
4.1. PODACI ZA ODABRANU LOKACIJU .....	41
4.2. IZRAČUN OČEKIVANE PROIZVODNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE.....	43
4.5. UTJECAJ PLOVIDBE NA ODABIR LOKACIJE WEC UREĐAJA .....	47
<b>5. ZAKLJUČAK .....</b>	<b>51</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>52</b>
<b>POPIS TABLICA.....</b>	<b>56</b>
<b>POPIS SHEMA .....</b>	<b>57</b>

# **1. UVOD**

## **1.1. PROBLEM, PREDMET I OBJEKTI ISTRAŽIVANJA**

Povijest pretvarača energije valova (engl. Wave Energy Converter -WEC) seže unazad nekoliko desetljeća. Od kraja 19. do sredine 20. stoljeća izumitelji i inženjeri započeli su istraživanja i eksperimente s uređajima poput plutača, oscilirajućih vodenih stupova i potopljenih turbina, no zbog tehnoloških izazova praktična primjena bila je ograničena. Moderna era WEC uređaja započela je 1970-ih zbog povećanog interesa za obnovljivim izvorima energije. Inženjeri su počeli razvijati različite vrste WEC-ova uključujući; točkaste apsorbere, prigušivače, oscilirajuće vodene stupce i uređaje za prelijevanje. Diljem svijeta provedeni su eksperimentalni projekti kako bi se poboljšali koncepti. Početkom u ranim 2000-ima, nekoliko WEC uređaja doseglo je komercijalnu fazu ili napredne faze pilot projekata. Zbog tehničkih i ekonomskih izazova mnogi su projekti doživjeli neuspjeh i obustavu, dok su drugi dosegli ograničenu komercijalnu uporabu. Posljednjih godina radi tehnološkog napretka i potrebe za smanjenjem potrošnje konvencionalnih izvora energije, istražuju se novi dizajni i materijali zajedno s naprednim sustavima upravljanja kako bi se optimizirala pretvorba energije i maksimizirala izlazna snaga.

Predmet istraživanja diplomskog rada koji proizlazi iz problema istraživanja je prikaz tehnologija za iskorištavanje energije morskih valova i mogućnost njihove primjene na području Republike Hrvatske. Objekt istraživanja ovog rada predstavljaju tehnologije i uređaji za iskorištavanje energije valova.

## **1.2. RADNA HIPOTEZA**

Identifikacija najprikladnijih postojećih tehnologija za iskorištavanje morskih valova u Republici Hrvatskoj, uzimajući u obzir specifične valovne uvjete, geografske karakteristike i potencijalne ekonomske i ekološke koristi, mogu pružiti smjernice za razvoj održivih i energetske neovisnih otočnih zajednica.

## **1.3. SVRHA I CILJEVI ISTRAŽIVANJA**

Svrha istraživanja je analizirati tehnološka obilježja sustava za iskorištavanje energije valova i mogućnosti primjene na području Republike Hrvatske.



Cilj ovog istraživanja je pružiti sveobuhvatnu analizu tehnologija za pretvorbu valova i prikazati njihov potencijal obnovljivog i održivog izvora energije.

#### **1.4. ZNANSTVENE METODE**

U ovom radu korištene su sljedeće znanstvene metode:

1. Kvalitativna metoda: prikupljanje podataka i analiza literature
2. Metoda analize i sinteze: kombiniranje različitih informacija i podataka kako bi se stvorio uvid u različitost tehnologija iskorištavanja energije valova te detaljno proučavanje podataka i izvora potrebnih za istraživanje.
3. Metoda dedukcije: uspostavljanje poveznice između teorijskog rada uređaja i konkretnih rezultata dobivenih istraživanjem.
4. Metoda komparacije: usporedba analiziranih uređaja na odabranoj lokaciji kako bi se donio zaključak o najoptimalnijem rješenju.
5. Povijesna metoda

#### **1.5. STRUKTURA RADA**

Diplomski rad podijeljen je u pet cjelina. U prvom poglavlju, **Uvodu**, obrazložen je problem predmet i objekti istraživanja, radna hipoteza, svrha i cilj istraživanja te korištene znanstvene metode.

Drugo poglavlje s naslovom **Osnovne značajke energije valova** započinje uvođenjem koncepta energije valova i njegovih značajki. U poglavlju se opisuju osnovne značajke valova, načini pohrane energije, razvojni proces sustava te metoda izračuna ekonomske isplativosti. Također, u poglavlju je dan pregled upotrebe energije valova u svijetu i njihov razvoj na području Europske Unije.

**Tehnologije iskorištavanja energije valova** naslov je trećeg dijela u kojem su opisane različite metode i tehnologije koje se koriste za iskorištavanje energije valova. Tehnologije su podijeljene prema ovisnosti sustava o smjeru vala.

U četvrtom poglavlju istražuju se **moćnosti iskorištavanja energije valova u Republici Hrvatskoj**. Prikupljeni podaci o odabranoj lokaciji i pretvaračima energije valova

korišteni su za analizu mogućnosti primjene uređaja za iskorištavanje valova te dobivanje podataka o njihovoj iskoristivosti. Analizirani su uređaji Archimedes Waveswing, AquaBuoy i Wave Dragon na lokaciji jugozapadno od otoka Lastova. Također, u radu je istražen utjecaj plovidbe na odabir lokacije uređaja.

U posljednjem dijelu, **Zaključku** dana je sinteza rada i spoznaja koje su proizašle iz diplomskog rada.

## 2. OSNOVNE ZNAČAJKE ENERGIJE VALOVA

Morski valovi izazvani su međudjelovanjem sile gravitacije, površinske napetosti i intenziteta protoka zraka. Svaki val posjeduje potencijalnu energiju koja je uzrokovana naprežanjem površine i kinetičku energiju koja nastaje uslijed strujanja morske vode. Vjetar koji pokreće čestice vode stvara kružne putanje koje formiraju valove te stvaraju pravilnu distribuciju.

### 2.1. OPĆENITO O MORSKIM VALOVIMA

Nastanak valova posljedica je vjetra koji prolazi iznad morske površine. Prijenos energije vjetra na valove postoji sve dok je brzina vjetra iznad valova veća od brzine širenja valova. Svaki val ima potencijalnu energiju koja je uzrokovana deformacijom morske površine i kinetičku energiju koja nastaje gibanjem mora.

Osnovne karakteristike vala mogu se definirati na sljedeći način<sup>1</sup>:

1. Amplituda vala je najveći pomak odnosno udaljenost za koju se čestica pomiče iz svog ravnotežnog položaja kada val prolazi kroz nju. Predstavlja intenzitet ili snagu vala.
2. Valna duljina je udaljenost između dvije uzastopne točke, dva vrha ili dva dola. Valna duljina obično se predstavlja grčkim slovom lambda ( $\lambda$ ), a mjeri se u metrima. postiže se brzinom vjetra, dubinom te topografijom mora. Promatrajući duljinu vala na određenu udaljenost, njegov oblik je pravilan. Valnu duljinu određuje udaljenost između dva vrha ili dva dola. Dugotrajni valovi koji se nalaze na otvorenom moru relativno su velike valne duljine i brzo se kreću, a energija vala znatno opada s dubinom.
3. Frekvencija vala odnosno učestalost određuje broj valova koji će se pojaviti u jedinici vremena, odnosno brzinu vala. Mjeri se u hercima ( $Hz$ ), a obrnuto je proporcionalna valnoj duljini.
4. Period vala je vrijeme koje je potrebno da se dogodi jedan potpuni ciklus ili oscilacija, recipročna je vrijednost frekvencije i mjeri se u sekundama.

---

<sup>1</sup> <https://www.geeksforgeeks.org/introduction-to-waves-definition-types-properties/>

5. Brzina vala je brzina kojom se val širi kroz medij. Određuje se svojstvima medija i obično se predstavlja slovom  $v$ .
6. Faza vala odnosi se na položaj čestice u valnom ciklusu u određenoj vremenskoj točki. Predstavlja se u stupnjevima ili radijanima, a pomaže u određivanju interferencije i superpozicije valova.

Budući da je frekvencija ( $f$ ) vala broj valova u sekundi, a period ( $T$ ) je u biti broj sekundi po valu, odnos između frekvencije i perioda. Iz odnosa je moguće vidjeti da veća učestalost znači kraće razdoblje. Njihov odnos može se prikazati na sljedeći način<sup>2</sup>:

$$f = \frac{1}{T} \text{ ili } T = \frac{1}{f}$$

Brzina širenja ( $v_w$ ) je udaljenost koju val prijeđe u određenom vremenu, što je jedna valna duljina u vremenu od jedne periode. Iz odnosa je vidljivo da u mediju gdje je brzina širenja konstantna, porastom frekvencije smanjuje se valna duljina ( $\lambda$ ). Taj odnos u obliku jednadžbe prikazan je kao:

$$v_w = \frac{\lambda}{T} \text{ ili } v_w = f\lambda$$

Kada se dva ili više valova susretnu u istoj točki, poremećaji tih valova se superponiraju, što se naziva fenomen superpozicije. Ako se poremećaji nalaze duž iste linije, tada je rezultirajući val zbroj poremećaja pojedinačnih valova, odnosno amplituda. Dva su različita slučaja: konstruktivna interferencija i destruktivna interferencija.<sup>3</sup>

Konstruktivna interferencija događa se kada dva identična vala dolaze u istu točku točno u fazi. Budući da se smetnje povećavaju, čista konstruktivna interferencija proizvodi val koji ima dvostruko veću amplitudu od pojedinačnih valova, ali ima istu valnu duljinu.

Destruktivna interferencija događa se kada dva identična vala dolaze u istu točku izvan faze. Budući da su poremećaji u suprotnom smjeru za ovu superpoziciju, rezultirajuća amplituda je nula, odnosno valovi se poništavaju.

---

<sup>2</sup> <https://openstax.org/books/physics/pages/13-2-wave-properties-speed-amplitude-frequency-and-period>

<sup>3</sup> <https://courses.lumenlearning.com/suny-physics/chapter/16-10-superposition-and-interference/>

Osnovne karakteristike vala definiraju njihovo ponašanje i svojstva omogućujući analizu i razumijevanje raznih fenomena u različitim područjima kao što su akustika, fizika, elektromagnetika i sl.

Prilikom analize valova, značajna visina vala često je korišten parameter, a predstavlja prosječnu visinu najviše jedne trećine vala u danom zapisu mjerenu u metrima ili stopama. Za sveobuhvatnu analizu valnih karakteristika u obzir se uzimaju dodatni parametri; valni period, smjer vala i analiza valnog spektra.

Kako bi odredili značajnu visinu vala potrebno je napraviti niz mjerenja visine valova uz pomoć valografa, plutača, radara ili drugih uređaja za mjerenje valova. Prikupljene podatke potrebno je poredati uzlaznim redoslijedom te odrediti ukupan broj mjerenja visine vala (oznaka  $N$ ). Cjelobrojna vrijednost jedne trećine ukupnog broja mjerenja predstavlja najvišu jednu trećinu valova (oznaka  $M$ ). Ukoliko je  $M$  cijeli broj, značajna visina vala jednaka je  $M$ -tom mjerenu na popisu, a ako nije cjelobrojna vrijednost značajna visina vala izračunava se kao prosjek  $M$ -tog i  $(M+1)$ -tog mjerenja.

Mjerenje visine valova važan je parameter u proučavanju valova i određivanju njihovog energetskog potencijala. Postoje različite metode za mjerenje visine valova, od kojih su neke:

1. Mjerne plutače opremljene sensorima
2. Radarski sustavi
3. Akustične metode
4. Lidarski sustav

Mjerne plutače opremljene sensorima za dobivanje podataka mogu koristiti različite tehnologije poput piezoelektričnih senzora, laserskih senzora i akcelometara. Plutače bilježe promjene u tlaku, ubrzanju ili udaljenosti kako bi se odredila visina valova. Podaci o visini valova odašilju se putem satelitske veze ili bežične tehnologije u prijemnu stanicu koja ih analizira i koristi u daljnjoj obradi ili praćenju.

Radarske plutače emitiraju elektromagnetske impulse prema površini mora i mjere reflektirane signale kako bi se odredila visina vala.

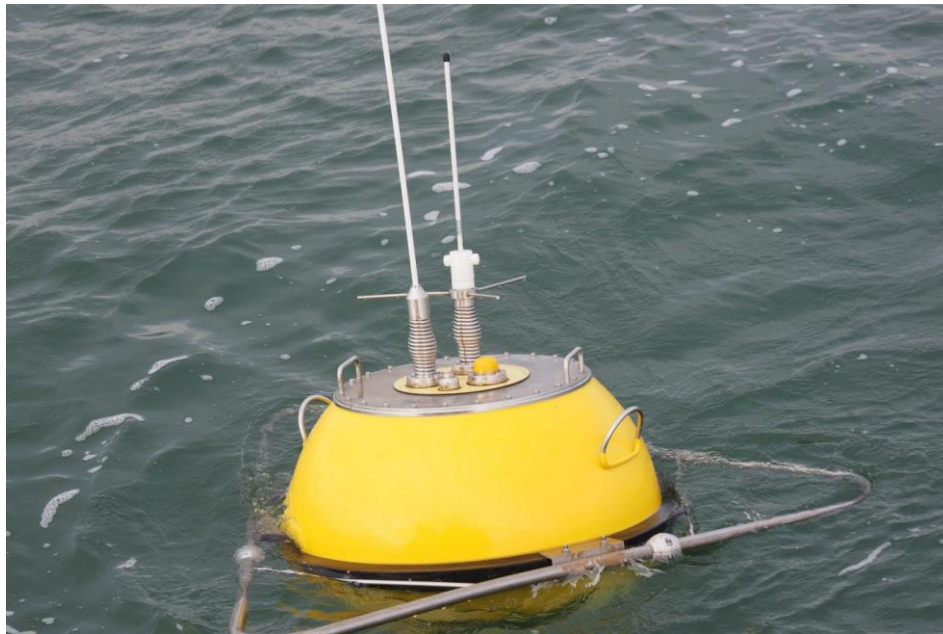
Akustičnom metodom emitiraju se zvučni impulse koji se odbijaju od morske površine i mjere vremensku razliku između emisije i povratka zvučnog vala.

Lidarski sustav koristi laserske snopove koji se odašilju prema površini mora, a reflektirani snopovi se mjere kako bi se odredila visina valova.

Odabir odgovarajuće metode mjerenja visine valova ovisi o specifičnim potrebama istraživanja, a kvaliteta dobivenih podataka ovisi o vremenskim uvjetima i svojstvima mora.

Jedan od češće korištenih uređaja za mjerenje visine vala i drugih valnih parametara je plutača Datawell Waverider Mk III. Plutača je opremljena sensorima koji koriste piezoelektrični princip za mjerenje promjene tlaka uzrokovane valovima. Podaci se pohranjuju u internoj memoriji ili se prenose putem bežične tehnologije na prijemnu stanicu.

**Slika 1: Datawell Waverider Mk III.**



Izvor: <https://rsaqua.co.uk/product/dwr-mkiii-waverider-buoy/>

Mjerenje parametara valova važno je radi prognoziranja ponašanja valova u budućnosti, što je od ključno u mnogim tehnologijama. Primjerice, u telekomunikaciji su karakteristike poput frekvencije, amplitude i faze koriste se za prijenos podataka. Također, u seizmologiji se analiza seizmičkih valova koristi kao pomoć u predviđanju potresa.

Planiranje mjesta za postavljanje uređaja za mjerenje valova ima značajan utjecaj na kvalitetu i točnost podataka koje će uređaj prikupiti, a time i na sve buduće planove i odluke koje se temelje na tim podacima.

Osim toga, lokacija uređaja treba biti planirana tako da se minimizira utjecaj bilo kakvih ometajućih faktora, kao što je primjerice plovidba. Planiranje mjesta za postavljanje uređaja za

mjerenje valova nije samo početni korak, već je i preduvjet za sve ostale faze planiranja. Bez točnih i pouzdanih podataka o valovima, planovi za njihovo korištenje, kontrolu ili zaštitu od njihovih potencijalno štetnih učinaka neće biti utemeljeni na čvrstoj osnovi, stoga je važno da se ova faza planiranja provede temeljito.

## 2.2. POHRANA ENERGIJE I INTEGRACIJA ENERGIJE U MREŽU

Rezultat procesa iskorištavanja valova, odnosno dobivenu energiju potrebno je pohraniti u uređaju za kratkoročnu ili dugoročnu pohranu. Neki od uređaja koji se koriste za kratkoročnu pohranu su<sup>4</sup>: kondenzatori, super kondenzatori i super vodljiva magnetska pohrana energije.

Elektrolitički kondenzatori najčešće se koriste za pohranu veće količine energije. Super kondenzatori imaju mogućnost isprazniti svu pohranjenu energiju u vrlo kratkom vremenu, a pohranjena energija proporcionalna je kapacitetu.

Supervodljiva magnetska pohrana energije vrsta je uređaja koja se koristi za kratkotrajnu pohranu. Sastoji se od zavojnice izrađene od materijala čija temperatura nakon što se ohladi ispod kritične, omogućuje zavojnici supervodljivost. Energija se pohranjuje u magnetskom polju, a kapacitet je neograničen. Supervodljiva magnetska pohrana trenutno se nalazi u fazi razvoja te su troškovi skuplji od ostalih sustava za skladištenje energije.

Neki od uređaja koji se koriste za dugoročnu pohranu su: skladištenje vodikovog goriva, baterije, skladištenje vodikovog goriva, skladištenje energije komprimiranim zrakom i pumpana hidroelektrana.

Najbolji način za pohranjivanje velikih količina energije je goriva ćelija na bazi vodika u kojoj se pomoću vodikovog plina stvara elektrolizer koji se pohranjuje u visokotlačnim spremnicima. Posljednjih godina detaljne analize pokazale su da su gubici prilikom pohrane i otpreme vrlo veliki.

Kako bi elektroenergetski sustav bio stabilan, potrebno je uskladiti napajanje i potrošnju kako bi frekvencija mreže bila u rasponu normalnog rada. Kada je potražnja za električnom

---

<sup>4</sup> Kavadiki Veerabhadrapa, B.G. Suhas, Chidanand K. Mangrulkar, R. Suresh Kumar, V.S. Mudakappanavar, Narahari, K.N. Seetharamu, Power Generation Using Ocean Waves: A Review, Global Transitions Proceedings, Volume 3, Issue 2, 2022, Pages 359-370

energijom veća od ponude, frekvencija opada i obrnuto. Odstupanja koja su prihvatljiva određena su u skladu mrežnim kodovima.

Promjenjiva obnovljiva energija kao što je energija valova ovisi o više faktora, stoga se izvozom veće količine energije smanjuje sigurnost opskrbe. Energija valova izazovno je područje radi prilagodbe izlazne snage i promjena u potražnji električne energije.

Sustavi za pohranu energije su načini kako bi se smanjila fluktuacija snage i isporuke u energetske mreže.

Metoda kontrolnog sustava upravljanja energijom pomoću dinamičkog graničnika brzine u kojem je kombinirana baterija i superkondenzator pokazuje sposobnost kontrole punjenja i pražnjenja baterije i smanjenja fluktuacije u mreži. Algoritam osigurava niske gubitke prebacivanjem potrebne i pohranjene snage preko sustava za pohranu energije. Kontrolni sustav za upravljanje energijom generira naredbu za potražnjom snage za kontrolere baterija i superkondenzatore kako bi se smanjilo opterećenje baterije i zadovoljila potražnja energije u istosmjernoj mreži.<sup>5</sup>

Model „*Wave-to-Wire*“ (W2W) može se podijeliti u četiri faze<sup>6</sup>:

1. Faza apsorpcije
2. Faza prijenosa
3. Faza proizvodnje
4. Faza kondicioniranja

U početnoj fazi apsorpcije valno gibanje pretvara se u oscilirajuće gibanje uređaja za iskorištavanje energije valova.

Prijenos apsorbirane energije može biti pneumatski, hidraulički, mehanički i magnetski. Izazov pri pretvaranju energije predstavljaju ekstremne varijacije između najveće vršne snage i prosječnog protoka energije.

U fazi proizvodnje hidraulička energija pretvara se u električnu energiju. Električnu energiju moguće je generirati pomoću rotacijskog ili linearnog generatora. Rotacijski generatori zahtijevaju prijenosni mehanizam između apsorbera i generatora. U izravnoj pretvorbi, uređaj

---

<sup>5</sup> A. Parwal, M. Fregelius, I. Temiz, M. Göteman, J.G. de Oliveira, C. Boström, M. Leijon, Energy management for a grid-connected wave energy park through a hybrid energy storage system, *Applied Energy*, Vol. 231, 2018

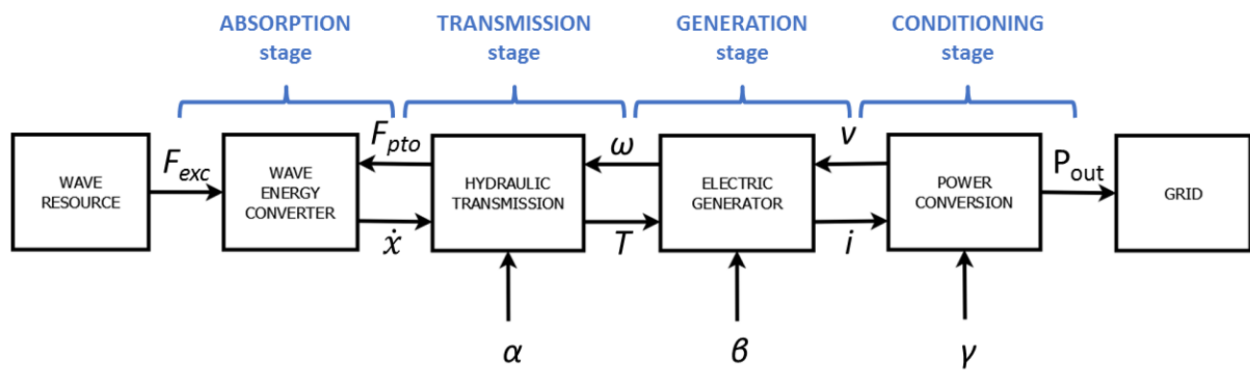
<sup>6</sup> Penalba M, Ringwood JV. A Review of Wave-to-Wire Models for Wave Energy Converters. *Energies*. 2016



za iskorištavanje energije valova izravno je linearnim generatorom povezan sa električnim generatorom, a tada sustav pretvorbe sadrži tri faze; apsorpciju, generiranje i kondicioniranje

U fazi kondicioniranja prilagođava se snaga proizvedene energije za isporuku u mrežu. Energetski elektronički pretvarači (engl. *Power Electronic Converters*) prilagođavaju signal izlazne snage kako bi se zadovoljili zahtjevi mreže. Trofazni pretvarač koji se sastoji od ispravljača i pretvarača spojenih preko istosmjernog kruga najčešće je korišten pretvarač zbog značajnog poboljšanja valnog oblika izlaznog napona.

**Slika 2: Dijagram pretvarača energije vala**



Izvor: Penalba, M.; Ringwood, J.V. A Review of Wave-to-Wire Models for Wave Energy Converters. *Energies* 2016, 9, 506

Kako bi se pojednostavilo planiranje, projektiranje i rad električne mreže razvijeni su mrežni kodovi koji predstavljaju smjernice za svaku proizvodnu elektranu te opisuju njihove zahtjeve. Mrežni kodovi mogu biti različiti za svaku državu.

Za povezivanje farme valova predložena je pomorska podstanica (engl. *Marine Substation*) koja predstavlja električni sustav smješten morskom dnu te su povezani nizom linearnih generatora od kojih je svaki povezan sa plutačom na površini koja pomoću jednog kabela isporučuje električnu energiju u mrežu. Kako bi se maksimizirala izlazna snaga potrebno je primijeniti prigušenja na WEC uređajima.<sup>7</sup>

<sup>7</sup> R. Ekström, M. Leijon, Control of offshore marine substation for grid-connection of a wave power farm, *International Journal of Marine Energy*, Vol.5, 2014.

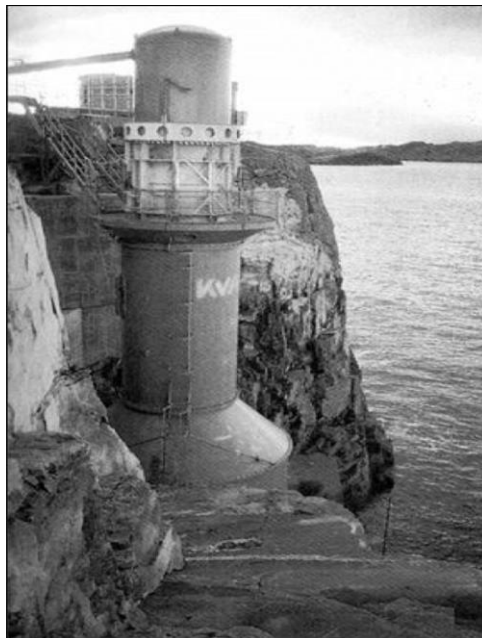
### 2.3. UPOTREBA ENERGIJE VALOVA U SVIJETU

1940-tih izumitelj Yoshio Masuda proveo je istraživanja o primjeni energije valova i izumio oscilirajući vodeni stupac za iskorištavanje energije valova za navigacijske plutače. Uređaj je koristio energiju valova na način da je upijao i komprimirao zrak kako bi pogonio generator za proizvodnju električne energije. Godine 1965. plutača je komercijalizirana, a nazivna snaga bila je u rasponu od 60 do 500 W. Ovaj projekt smatra se prvom uspješnom komercijalizacijom uređaja za energiju valova.<sup>8</sup>

Povećano zanimanje i poticaj istraživanja energije valova uzrokovala je naftna kriza 1973. godine. Pad cijena nafte 80-ih godina prošlog stoljeća rezultirao je smanjenjem financijskog ulaganja u razvoj projekata obnovljivih izvora energije, pa tako i energije valova.

Godine 1974. Stephen Salter, profesor Sveučilišta u Edinburghu objavio je članak o energiji valova u časopisu Nature, čime je privukao pozornost mnogih znanstveno-istraživačkih institucija. Mnoge zemlje koje posjeduju veće potencijale za iskorištavanje energije valova poput Ujedinjenog Kraljevstva, Japana i Norveške smatrali su energiju valova rješenjem energetske krize i uložili znatna financijska sredstva u istraživanje i razvoj.

**Slika 3: Obalni OWC u Norveškoj oko 1985.**



Izvor: Falcao, Antonio & Henriques, Joao., Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines: A review. Renewable Energy, 2016

---

<sup>8</sup> ibid.

Godine 1910. Francuz po imenu Busso Belasek izumio je elektranu pokretanu energijom valova, koja je osiguravala električnu energiju od 1000 W za njegove zgrade. Elektrana je generirala energiju putem pneumatskog valovitog uređaja koji je mogao komprimirati ili isušivati zrak snagom iz fluktuacije valova i gurati klip da se kreće recipročno, što se pretvaralo u rotaciju turbine za proizvodnju električne energije.<sup>9</sup>

Istraživanje i investiranje u tehnologije iskorištavanja morskih valova aktivno se provodi u nekoliko zemalja diljem svijeta, a neke od njih su Ujedinjeno Kraljevstvo, Portugal, SAD, Australija i Škotska.

Razvoj energije valova započeo je u Ujedinjenom Kraljevstvu gdje se nalazi Europski centar za energiju mora – EMEC (*European Marine Energy Centre*), čija je svrha testiranje različitih pretvarača energije valova. Jedan od značajnijih projekata bio je uređaj Pelamis.

Aquadora Wave Farm smješten uz obalu Portugala bio je prvi komercijalni projekt iskorištavanja energije valova korištenjem tri Pelamis pretvarača koji je započeo 2008. godine, no zbog svjetske ekonomske krize projekt je trajao samo dva mjeseca. Ukupni troškovi opremanja i postavljanja iznosili su preko 11 milijuna američkih dolara, a imala je potencijal opskrbljivati više od 1500 kućanstava.<sup>10</sup> Portugal i dalje znatno ulaže u razvoj i istraživanje tehnologija za iskorištavanje morskih valova.

Svrha PMEC (*Pacific Marine Energy Centre*) koji se nalazi u SAD-u je testiranje uređaja za energiju valova kako bi se unaprijed mogli procijeniti utjecaji tehnologija na okoliš.

Potencijal energije valova aktivno istražuje Australija, a značajniji primjeri su King Island Renewable Energy i Albany Wave Energy Project. U Australiji je 2021. vlada odobrila nacionalni Zakon o infrastrukturi električne energije na moru, što daje politički okvir za izgradnju i rad na projektima električne energije na moru.<sup>11</sup>

Inicijativa Wave Energy Scotland aktivno podupire razvoj energije valova s ciljem ubrzanja komercijalizacije tehnologija i osiguranja financijskih potpora za inovacije u tom sektoru.<sup>12</sup>

---

<sup>9</sup> Hangfei Li, Xiwen Sun, Hui Zhou, "Wave energy: history, implementations, environmental impacts, and economics," Proc. SPIE 12326, 2nd International Conference on Materials Chemistry and Environmental Engineering, CONF MCEE 2022.

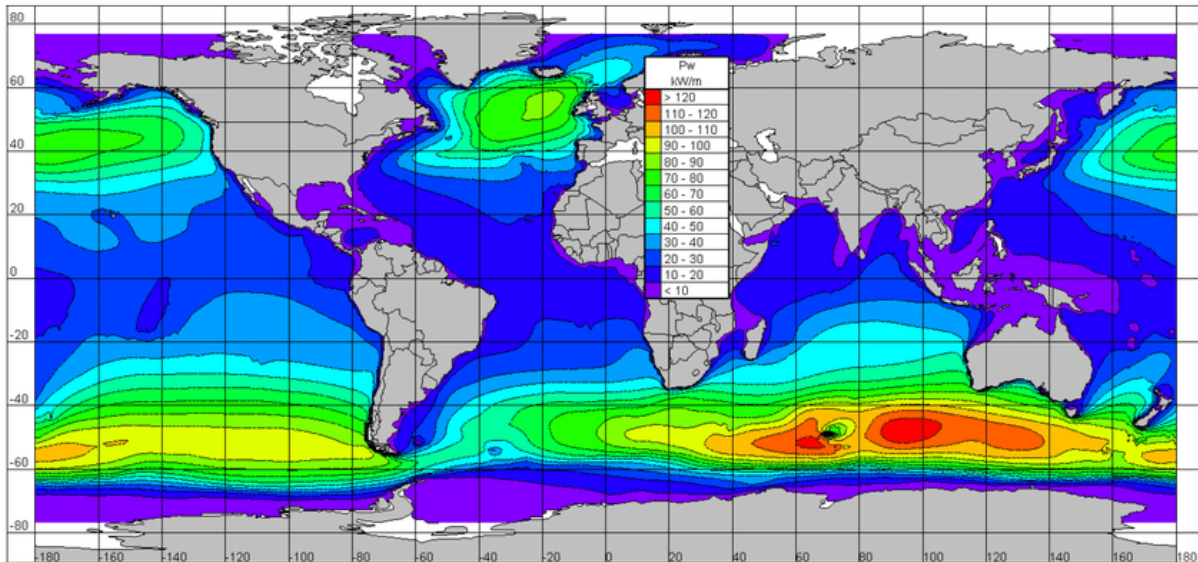
<sup>10</sup> <https://www.marineinsight.com/offshore/the-agucadoura-wave-farm-the-worlds-first-wave-farm/>

<sup>11</sup> <https://www.weforum.org/agenda/2022/03/wave-energy-ocean-electricity-renewables/>

<sup>12</sup> <https://www.oceanenergy-europe.eu/annual/wave-energy-scotland-wes/>

Energetski najbogatiji valovi koncentrirani su u umjerenim zonama (40°- 60° geo. širine) i na dubinama većim od 40 m. Kombinacija povoljnih vremenskih uvjeta, oblika priobalja i međudjelovanje oceana i atmosfere rezultat su koncentracije energetski bogatih valova u umjerenim zonama.

**Slika 4: Globalna distribucija srednje godišnje snage valova**



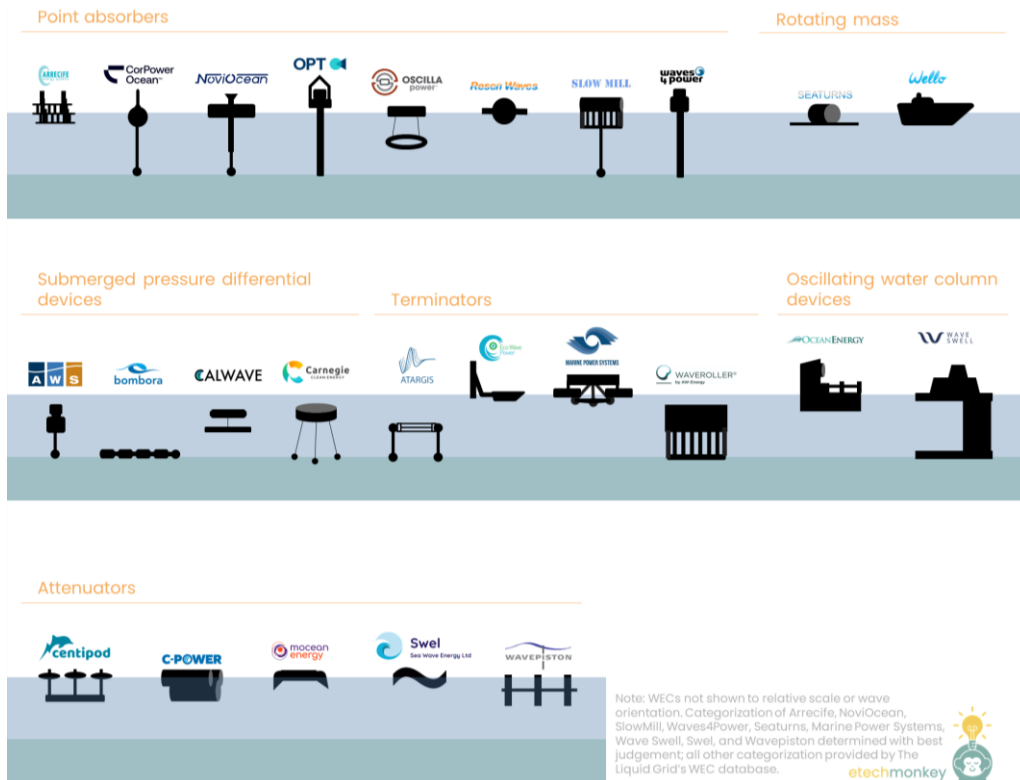
Izvor: Cornett, Andrew. (2008). A Global Wave Energy Resource Assessment. In: Proceedings of the eighteenth international offshore and polar conference. 50.

Tehnologije energije valova nisu konvergirale prema jednoj vrsti dizajna, već postoji desetak različitih tipova koji se provode. Razina tehnološke spremnosti za iskorištavanje energije valova niža je od drugih tehnologija iskorištavanja energije mora, a primjena je ograničena na demonstracijske i pilot projekte s približno 2,3 MW instaliranih uređaja globalno.<sup>13</sup>

Iako je u posljednjih nekoliko desetljeća predloženo na stotine WEC dizajna, većina projekata nije dosegla fazu komercijalizacije. Trenutno je poznato približno 25 različitih dizajna WEC uređaja koji se aktivno nalaze na putu ka komercijalizaciji. Uređaji se razlikuju po smjeru upadnog vala, dubini postavljanja uređaja, sustavu priveza i turbinama. Slika 5 prikazuje stanje tržišta WEC uređaja u 2022. gdje su prikazane različite i tvrtke koje aktivno istražuju i unaprjeđuju svoje dizajne.

<sup>13</sup> <https://energypost.eu/unlocking-the-potential-of-ocean-energy-from-megawatts-to-gigawatts/>

Slika 5: WEC dizajni



Izvor: <https://etechmonkey.com/index.php/2022/11/04/wave-energy-pt-2-the-wild-world-of-wave-energy-converters/>

## 2.4. RAZVOJ ENERGIJE VALOVA NA PODRUČJU EU

U siječnju 2014. Objavljen je dokument pod nazivom “*Plava energija, djelovanje potrebno za iskorištavanje potencijala energije europskih mora i oceana do 2020. I kasnije*”. Dokument sadrži akcijski plan potpore razvoju energije oceana, a dio se odnosi i na energiju valova.

Europska Komisija je u studenom 2020. godine objavila je *Europsku strategiju za energiju iz obnovljivih izvora na moru* koja predlaže načine potpore za dugoročno održivi razvoj ovog sektora. Ciljevi do 2030. godine uključuju instalaciju najmanje 1 GW energije oceana, odnosno 40 GW do 2050. godine. Strategija također promiče suradnju država članica EU i koordinaciju napora u razvoju obnovljive energije na moru s ciljem postizanja održive, čiste i sigurne energetske budućnosti.

Kako bi povećala svoj učinak, Strategija se bavi se i širim pitanjima kao što su<sup>14</sup>:

1. pristup morskom prostoru
2. regionalna i međunarodna suradnja
3. sektori industrije i zapošljavanje
4. tehnološki prijenos istraživačkih projekata iz laboratorija u praksu

Strateški plan za energetska tehnologija (*Strategic Energy Technology Plan* -SET) je dokument koji identificira ciljeve, prioritete i smjernice za razvoj i primjenu inovativnih energetskih tehnologija. Cilj smanjenja troškova oceanskih tehnologija za energiju valova iznosi 0,20 €/kWh do 2025. i 0,15 €/kWh do 2050. godine.

Također, *strategija EU-a za iskorištavanje potencijala energije iz obnovljivih izvora na moru za klimatski neutralnu budućnost* ističe da bi se razvoj industrije obnovljivih izvora energije iz mora do 2030. trebala povećati pet puta, a do 2050. dvadeset i pet puta.<sup>15</sup>

Prema podacima OEE (*Ocean Energy Europe*) od 2010. do 2022. godine 12,7 MW instalacija postavljeno je u Europi, od kojih se u pogonu nalazi samo 400 kW, a 12,3 MW stavljeno je izvan pogon nakon završetka istraživanja.<sup>16</sup>

U 2021. u sklopu inovativnog programa „Wave Energy Scotland“ koji je financiran EU programom „Europe Wave“ postavljen je uređaj Archimedes Waveswing, a danas se nalazi u trećoj fazi na testnom mjestu EMEC-a u Scapa Flow-u.

Sigma WEC uređaj novi je uređaj tipa točkasti absorber koji pretvara vertikalno kretanje kružne plutače u električnu energiju. Elementi koji se nalaze iznad morske površine su spar struktura i plovak, dok se ispod morske površine nalazi element uzgona, zatezne noge i tetive. Instalacija posjeduje vlastiti PTO s inercijskim jednosmjernim spojkama. Kružni dizajn plovka s otvorenim dnom i jednosmjernim ventilima omogućuje hvatanje unaprijed izračunate i određene količine morske vode, čime se u slučaju ekstremnih situacija smanjuje opterećenje dna. Testiranje koje se provodilo u Crnoj Gori 2017. godine rezultiralo je šestomjesečnom opskrdom crnogorske električne mreže uređajem snage 30 kW.

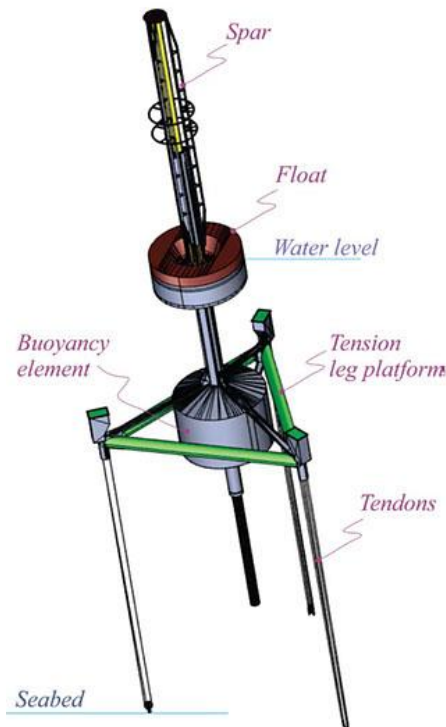
---

<sup>14</sup> [https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/offshore-renewable-energy\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/offshore-renewable-energy_en)

<sup>15</sup> <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/hr/sheet/70/energija-iz-obnovljivih-izvora>

<sup>16</sup> Ocean Energy Europe, Ocean Energy Key trends and statistics 2022, March 2023.

**Slika 6: Sigma WEC**



Izvor: <https://www.sigma-energy.si/technology/>

Pretvarač energije valova C4 CorPower Ocean tvrtke u 2023. trebao bi biti instaliran na lokaciji u Aquadora, Portugal. Plan projekta je izgraditi i spojiti na mrežu farmu valova u koju će biti uključeno četiri uređaja snage 300 kW.

Najveći udio patenata visoke vrijednosti u sveukupnoj oceanskoj energiji od 2019. godine posjeduje Kina, koja je u usporedbi s EU imala trostruko više privatnih ulaganja u posljednjih pet godina. U 2022. privatna ulaganja u Europi iznosilo je 15 milijuna eura.

Očekuje se da će na području EU otoci biti ključni za razvoj tehnologija energije valova kao dio strategije obnovljivih izvora energije na moru.

## **2.5. RAZVOJNI PROCES SUSTAVA ZA ISKORIŠTENJE ENERGIJE VALOVA**

Sustavni plan za pretvarače energije valova uspostavljen je na temelju dobivenih iskustava testiranja prvih prototipa uređaja za iskorištavanje energije valova, a uključuje preporuke postupaka u pet faza, od razvoja ideje do komercijalne upotrebe.

Pet faza sustavnog plana uključuju<sup>17</sup>:

1. Validaciju koncepta
2. Validaciju dizajna
3. Validaciju sustava
4. Validaciju uređaja
5. Ekonomsku validaciju

Validacija koncepta uključuje testiranje modela u malom mjerilu, u nizu pravilnih valova praćenih nepravilnim morskim stanjima. Prvi testovi trebaju identificirati i opisati fizičke procese u odnosu na projektne varijable kako bi se mogle optimizirati dimenzije uređaja.

Validacija dizajna je testiranje modela u većem mjerilu u svrhu dobivanja opsežnijih podataka, pogotovo glede izdržljivosti uređaja na vanjske utjecaje. Tijekom ove faze u obliku idejnog projekta utvrđuje se osnovni trošak komponenti sustava.

Validacija sustava podrazumijeva testiranje svih podsustava koji uključuju potpuno operativni sustav pretvaranja energije valova s ciljem testiranja prototipa koji može biti postavljen na moru te proizvoditi električnu energiju. U ovoj fazi započinje pribavljanje opreme, licenci, dozvola, certifikata i usklađivanje sa zahtjevima ekološkog dizajna.

Validacija uređaja uključuje dokazivanje funkcioniranja dizajna u punoj veličini, ispitivanje jednog uređaja na lokaciji s umjerenim stanjem mora prije konačne instalacije na određenu lokaciju. Prije završetka faze uređaj mora biti dokazano prikladan za namjenu i priključen na mrežu.

Ekonomska validacija je završna faza koja uključuje testiranje više uređaja, a tehnički rizik u ovoj fazi trebao bi biti minimalan. Budući da se ispituje ekonomski potencijal više uređaja, financijski rizici su manje izvjesni. Istražuju se hidrodinamičke interakcije uređaja i stabilnost opskrbe električnom energijom, te ekološki, fizički, biološki aspekti kao i socioekonomski učinak na lokalno područje.

Dva ključna čimbenika za uspjeh tijekom morskih ispitivanja u svim fazama su projektiranje uređaja koji uključuje rezervni uzgon koji bi spriječio potpuno potonuće u slučaju proboja trupa i osiguranje sigurnosti vezova i sidara.<sup>18</sup>

---

<sup>17</sup> B. Holmes & K. Nielsen (2010) Report T02-2.1 Guidelines for the Development & Testing of Wave Energy Systems, OES-IA Annex II Task 2.1

<sup>18</sup> Ibid.



Svaka faza smjernica za razvoj i testiranje sustava energije valova sadrži upute o obrazloženju rasporeda i proračuna, postrojenju, metodologiji, mjerenjima, analizi i prezentaciji podataka odnosno prikupljenoj dokumentaciji.

## 2.6. PROCJENA EKONOMSKE ISPLATIVOSTI INTEGRACIJE WEC UREĐAJA

Važan čimbenik pri procjeni isplativosti ulaganja je cijena proizvedene energije. Zainteresiranost potencijalnih ulagača moguće je postići jedino osiguranjem povrata ulaganja. Stoga industrija proizvodnje energije valova mora biti isplativa ali i konkurentna na tržištu s obzirom da nije jedini obnovljivi izvor energije mora. Postoji vrlo malo studija u kojima je napravljena ekonomska analiza radi manjeg broja uređaja koji se nalaze u fazi komercijalizacije.

Troškovi su određeni raznim čimbenicima, a značajan predstavlja dubina mora koja utječe na izbor između plutajućih ili fiksnih pretvarača energije valova. Trošak instalacije i održavanja raste povećanjem udaljenosti od obale, a koje je moguće reducirati kombiniranjem različitih tehnologija za iskorištavanje energije mora. Također, troškove je moguće smanjiti instalacijom većeg kapaciteta, odnosno uređaja za iskorištavanje valova.

Kako bi se izračunala ekonomska isplativost uređaja za iskorištavanje morskih valova, koriste se sljedeće formule:

LCOE (eng. *Levelized Cost of Energy*) – izjednačeni trošak energije predstavlja prosječni trošak proizvodnje jedne jedinice tijekom njezinog radnog vijeka. Formula za izračun LCOE može se izraziti kao<sup>19</sup>:

$$LCOE = \frac{\sum_{y=0}^Y NPV(CapEx_y) + \sum_{y=0}^Y NPV(OpEx_y) + \sum_{y=0}^Y NPV(pro_y)}{\sum_{y=0}^Y NPV(AEP_y)}$$

gdje Y predstavlja životni vijek projekta, y godinu, NPV neto sadašnju vrijednost, CapEx kapitalni izdatak, OpEx operativni trošak, Dec je trošak izgradnje i AEP godišnja proizvodnja energije u KWh.

Ili pojednostavljeno:

---

<sup>19</sup>Šljivac, D.; Temiz, I.; Nakomčić-Smaragdakis, B.; Žnidarec, M. Integracija elektrana na valovima u elektroenergetske sustave jadranskih otoka: tehničke mogućnosti i međusektorski aspekti. *Voda* 2021.

$$LCOE = \frac{\text{ukupni trošak tijekom radnog vijeka uređaja}}{\text{ukupni učinak energije tijekom radnog vijeka uređaja}}$$

Ukupni troškovi tijekom radnog vijeka uključuju kapitalne troškove (koji uključuju instalaciju uređaja, održavanje i stavljanje izvan pogona), operativne troškove i troškove financiranja. Ukupni učinak energije tijekom radnog vijeka uređaja odnosi se na količinu električne energije koju generiraju uređaji.

NPV (engl. *Net Present Value*) -neto sadašnja vrijednost koristi se za određivanje isplativosti ulaganja usporedbom sadašnje vrijednosti novčanih priljeva (prihoda) i odljeva (troškova) koji nastaju prilikom trajanja projekta.

$$NPV = \Sigma[(\text{prihod} - \text{trošak})/(1 + \text{diskontna stopa})^t]$$

Gdje  $\Sigma$  predstavlja zbroj svih novčanih tokova tijekom projekta,  $t$  vremensko razdoblje, a diskontna stopa vremensku vrijednost novca.

Razdoblje povrata (engl. *Payback period*) pokazuje vremenski period potreban kako bi kumulativni novčani priljevi bili jednaki početnom trošku ulaganja.

$$PP = \frac{\text{početni trošak ulaganja}}{\text{godišnji priljev novca}}$$

Navedene formule pružaju opći okvir za procjenu isplativosti, no potrebna su dodatna razmatranja na temelju specifičnih obilježja projekta (učinkovitost, lokacija, održavanje, poticaji i sl.).

Studija Zajedničkog istraživačkog centra EU (*Joint Research Centre – JRC*) iz 2019. procjenjuje da se izjednačeni trošak energije (LCOE) za energiju valova kreće u rasponu od 0,47 do 1,02 €/kW. Očekuje se da će kontinuirani tehnološki razvoj i napredak smanjiti raspon LCOE do 2030. godine.<sup>20</sup>

Politički poticaji i inovativni poslovni modeli dva su ključna elementa kako bi se smanjila razlika između trenutnih i optimalnih troškova. Politika može imati značajan utjecaj na troškove pružajući financijsku podršku za istraživanje i razvoj, dok inovativni poslovni modeli mogu pružiti nove načine za efikasnije trošenje resursa i smanjenje troškova.

---

<sup>20</sup> ibid ref. 10

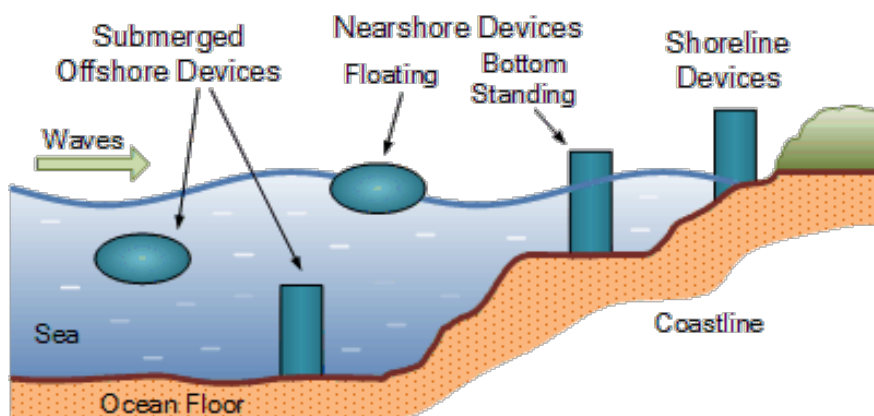
### 3. TEHNOLOGIJE ISKORIŠTAVANJA ENERGIJE VALOVA

Postrojenja za iskorištavanje energije valova moguće je podijeliti s obzirom na lokaciju, način rada i ovisnosti o smjeru vala.

S obzirom na lokaciju na kojoj se nalazi, tehnologija može biti obalna ili odobalna. Obalni uređaji imaju prednost što se nalaze u blizini komunalne mreže, jednostavni su za održavanje, a budući da su valovi prigušeni dok putuju kroz plitku vodu, njihova vjerojatnost oštećenja u ekstremnim uvjetima je smanjena. Obalni uređaji često su pričvršćeni za morsko dno, no nedostatak ovih uređaja je plitka voda koja dovodi do valova smanjene snage što ograničava potencijal iskorištavanja.<sup>21</sup>

Odobalni uređaji imaju prednost prikupljanja veće količine energije zbog većeg sadržaja energije u valovima koji se nalaze na otvorenom moru. Međutim, njihova gradnja i održavanje je otežano, a zbog veće visine valova i sadržaja energije u valovima moraju biti dizajnirani na način da izdrže ekstremnije uvjete, što dovodi do povećanja troškova izgradnje.<sup>22</sup>

**Slika 7 : Podjela uređaja s obzirom na udaljenost od obale**



Izvor: Md. Masood Ahmad, Amit kumar, Md. Sarfaraj Alam, Harnessing of Wave Energy as Renewable Energy: An Overview, International Journal of Innovative Science and Research Technology, Volume 4, Issue 8, August

– 2019

Neke od prednosti uređaja za pretvorbu energije valova u električnu energiju uključuju; održivost, obnovljivost, dostupnost, skalabilnost i neovisnost.

<sup>21</sup> Drew B, Plummer AR, Sahinkaya MN. A review of wave energy converter technology. Proc Inst Mech Eng Part A-J Power Energy 2010.

<sup>22</sup> Ibid.

Energija valova obnovljivi je izvor čijim se iskorištavanjem ne proizvode emisije štetnih plinova, dok dostupnost valova i njihova predvidivost u obalnim područjima diljem svijeta može osigurati dosljedan izvor energije. Skalabilnost je prednost koja se odnosi na veličinu i snagu uređaja koju je moguće optimizirati kako bi se zadovoljili različiti energetske zahtjevi. Bliže obalne zajednice koristeći energiju proizvedenu iz uređaja za energiju valova mogu smanjiti ovisnost o dalekovodima te na taj način povećati energetske sigurnost.

Nedostaci ovih uređaja uključuju; visoke troškove, tehnološke izazove, ograničenu prikladnost lokacija i moguće negativne utjecaje na okoliš.

Provedba istraživanja, projektiranje, proizvodnja i postavljanje uređaja mogu doseći vrlo visoke troškove, zbog čega energija valova postaje upitne financijske isplativosti s obzirom na ostale konkurentne izvore energije. Tehnološki izazovi uključuju utjecaj morskog okoliša (obrastanje, oštećenja uzrokovana olujama i sl.) na trajnost i performanse uređaja. Uređaji zahtijevaju redovito održavanje i nadzor u teškim uvjetima, što predstavlja logistički izazov a time i povećanje operativnih troškova.

Osim ispitivanja uređaja, PMEC (*Pacific Marine Energy Center*) omogućuje istraživačima praćenje učinaka na okoliš. Elektromagnetska polja povezana s opremom za iskorištavanje energije valova mogu utjecati na hranjenje i orijentaciju morskih vrsta. Primjerice, morski psi i raže imaju jedinstvenu sposobnost osjetiti elektricitet koji stvara kretanje plijena. Također, buka koja nastaje radom uređaja može utjecati na morske vrste ometanjem ehlokacije i komunikacije.<sup>23</sup>

Napravljeno je nekoliko pokušaja razvitka "WEC-friendly" numeričkog modelirajućeg alata koji pomažu u pojednostavljenju procesa potrebnih za procjenu potencijalnih ekoloških utjecaja. Jedan takav primjer je otvoreni numerički model Simuliranje valova u priobalju (SWAN). Ovaj model je primijenjen od strane istraživača kako bi se karakterizirale promjene u dinamici valova u zavjetrini simuliranih WEC polja uz obalu Santa Cruz i Newporta. Autori su otkrili da visine valova, orbitalne brzine na dnu i radijacijski stres pokazuju promjene u blizini WEC polja. Prostorni uzorci smanjenja visine valova variraju s pravcem dolazećeg vala. Također je utvrđeno da su promjene u smjeru valova i periodu valova neznatni.<sup>24</sup>

---

<sup>23</sup> Oregon State University;PMEC,NNMREC, University of Washington, Wave-Energy Devices Affect the Natural Environment:Scientists plan research to better understand effects,Sea Grant Oregon Publications, February 2022.

<sup>24</sup> Roberts, Jesse D., et al. An environmental impact assessment framework for wave energy installations. No. SAND2017-5798C. Sandia National Lab.(SNL-NM), Albuquerque, NM (United States), 2017.

### 3.1. PODJELA TEHNOLOGIJA ZA ISKORIŠTAVANJE ENERGIJE VALOVA

Sustavi za iskorištavanje energije valova mogu se podijeliti na ovisne i neovisne sustave, ovisno o načinu na koji promjena smjera vjetra ili valova utječe na proizvodnju električne energije. Kod ovisnih sustava, proizvodnja električne energije ovisi o smjeru vjetra ili valova. Promjena smjera može utjecati na učinkovitost proizvodnje energije, a sustavi su osjetljivi na promjene u okolini.

S druge strane, neovisni sustavi manje su osjetljivi na promjene smjera vjetra ili valova. Dizajnirani su na način da pokreću uređaje neovisno o smjeru, što pruža stabilniju proizvodnju električne energije bez obzira na uvjete.

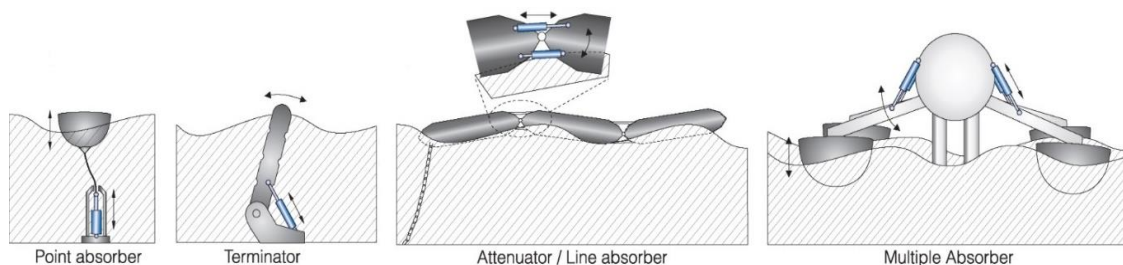
Tehnologije je moguće podijeliti s obzirom na smjer upadnog vala na:

1. Prigušivače (eng. *Attenuators*)
2. Točkaste apsorbere (eng. *Point absorbers*)
3. Apsorbere s više točaka (eng. *Multiple point absorbers*)
4. Završnike (engl. *Terminator*)

Također, uređaje je moguće podijeliti s obzirom na način rada:

1. Potopljene uređaje za diferencijalni tlak (eng. *Submerged pressure differential*)
2. Prenaponske pretvarače oscilirajućeg vala (eng. *Oscillating wave surge converters*)
3. Oscilirajući vodeni stupac (eng. *Oscillating water column- owc*)
4. Uređaj za prelijevanje (eng. *Overtopping device*)

**Slika 8: Različiti načini pretvorbe energije s obzirom na smjer upadnog vala**



Izvor: Hansen, R.H.; Kramer, M.M.; Vidal, E. Discrete Displacement Hydraulic Power Take-Off System for the Wavestar Wave Energy Converter. *Energies* 2013

### 3.1.1. Sustavi neovisni o smjeru vala

Sustavi koji su neovisni o smjeru vala uključuju: prigušivače, točkaste apsorbere i apsorbere s više točaka.

**Prigušivači** su uređaji koji se sastoje od više povezanih dijelova koji plutaju po površini, paralelno sa valovima što uzrokuje moment savijanja koji pokreće turbinu ili hidraulički motor. Prilikom dizajna i postizanja najveće efikasnosti važan faktor je dominantna valna duljina.

Kao odgovor na nestašicu nafte 70-ih godina prošlog stoljeća profesor Sveučilišta u Edinburghu izumio je Edinburšku patku, poznatu i kao Salterova patka. Uređaj je naziv dobio po oscilirajućim pokretima koji podsjeća na patku koja kima.

Prvi model “patke” razvijen 1973. rotirao se oko fiksne osi, a njen oblik trebao je oponašati istiskivanje vode na strani prema valovima, dok ne stvara nove valove u zavjetrini. Relativno kretanje između svake posebno oblikovane plutače i spojeva koristi se za pumpanje hidrauličke tekućine kroz motor. Niz međusobno povezanih plutača pomoću sajle čine tzv. Salterov sustav. Koeficijent prigušenja određivao je omjer zakretnog momenta i brzine koji je modelu prikazao njegov dinamometar s pogonskim vratilom.

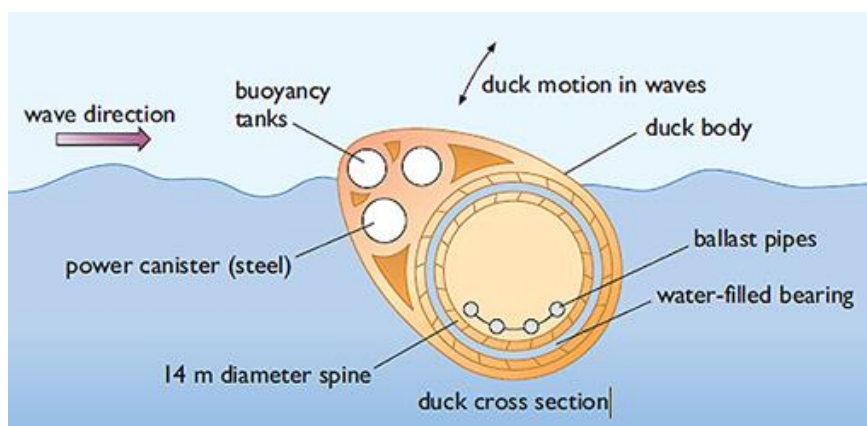
Dugogodišnja istraživanja dovela su do sljedećih zaključaka <sup>25</sup>:

1. Povećanjem duljine vodene linije nastaje dodatna inercija i odgođeni početak nelinearnih učinaka čime je omogućeno apsorpiranje većih amplituda
2. Ukoliko se izvor snage prilagodi dodavanjem fazno pomaknutog člana koji djeluje kao negativna opruga, performanse u dužim valovima su poboljšane
3. Ako se nosaču dopusti da se kreće pravom fazom i amplitudom, stražnja površina patke stvoriti će valove iza kojih se poništavaju oni koji prolaze ispod, stoga neće biti gubitka energije prema zavjetrini.
4. Težina postavljenih uređaja na dugačkoj krutoj “kralježnici” izazvali bi momente i savijanja, a rješenjem se smatralo ugradnja mehanizma popuštanja temeljenog na visokotlačnoj uljnoj hidraulici

---

<sup>25</sup> Salter, S.H. (1986). Progress on Edinburgh Ducks. In: Evans, D.V., de Falcão, A.F.O. (eds) Hydrodynamics of Ocean Wave-Energy Utilization. International Union of Theoretical and Applied Mechanics. Springer, Berlin, Heidelberg.

**Slika 9: Edinburška patka**



Izvor: [https://www.open.edu/openlearn/mod/oucontent/view.php?id=73764&extra=thumbnailfigure\\_idm378](https://www.open.edu/openlearn/mod/oucontent/view.php?id=73764&extra=thumbnailfigure_idm378)

Istraživanje Edinburške patke (poznata i kao Salterova Patka) značajno je pridonio u razvoju Pelamis uređaja.

Pelamis Wave Power 2004. godine predstavio je prototip pretvarača energije prigušujućih morskih valova koji ne djeluje na visinu valova već njihov oblik. Uređaj se sastojao od četiri povezana dijela dužine 120m i promjera 3,5m. Rezultati testiranja do 2007. godine doveli su do razvoja drugog prototipa uređaja koji se sastojao od pet povezanih dijelova dužine 180m, promjera 4m i težine 1350 tona.

Prvi Pelamis stroj P2 koji je kupljen od strane komunalne tvrtke iz Ujedinjenog Kraljevstva 2009. godine, snage 750 kW instaliran je na mjestu za ispitivanje valova Billia Croo.

**Slika 10: Dva Pelamisova pretvarača na ispitnom mjestu Billia Croo EMEC**

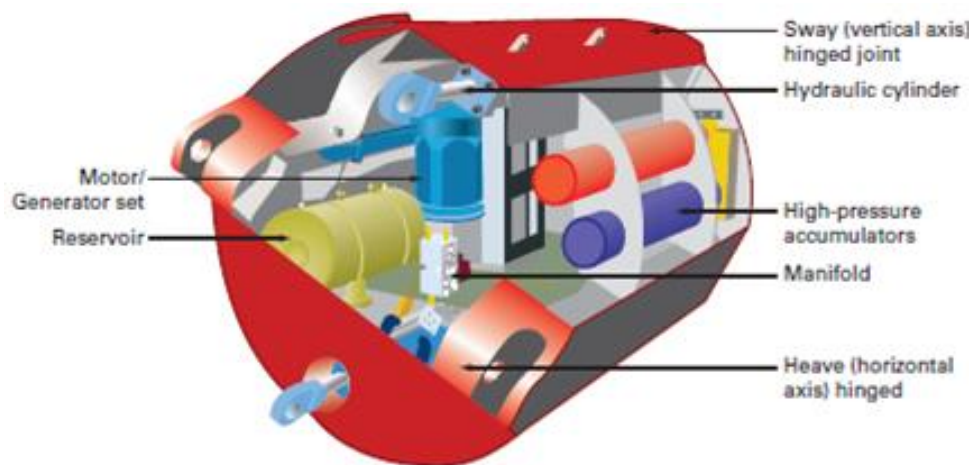


Izvor: <https://tethys.pnnl.gov/project-sites/pelamis-wave-power-p2-demonstration-emec>

Glavne konstrukcijske cijevi izrađene su od filamentno namotane cijevi od staklenih vlakana.<sup>26</sup> Sastoji se od niza plutajućih polu-potopljenih cilindričnih dijelova koji su povezani zglobnim spojevima i modula za pretvorbu energije.

Sustav za proizvodnju električne energije zajedno s ispravljačkim krugom smješten je unutar same strukture. Hidraulički cilindri odupiru se gibanju izazvanom valovima te ubrizgavaju visokotlačno ulje kroz zaglađujući akumulator do hidrauličkih motora koji pokreću električne generatore za proizvodnju energije. Proizvedena električna energija iz svih spojnica vođena je kroz kabel do stanice na morskom dnu, a na jedan kabel moguće je povezati više uređaja. Privezni sustav sastoji se od kombinacije plovaka i utega koji sprječavaju zatezanje užadi, dopuštajući uređaju da se okreće prema nadolazećim valovima.

**Slika 11: Prikaz presjeka hidrauličkog motora uređaja Pelamis**



Izvor: Li, Kui & Parthasarathy, Nanjundan & Park, Young-Kyu & Jung, Ho-Yun & Choi, Yoon-Hwan & Lee, Yeonwon. (2011). Study on the Motion of Floater Structure for Design of Wave Energy Generation in Ocean.

Journal of the Korean Society of Marine Engineering. 35. 632-639.

Istraživanje Sveučilišta sjevernog Illinoisa temeljilo se na simulaciji dinamičkog ponašanja sustava Pelamis P2 u različitim uvjetima. Na temelju rezultata utvrđeno je da s povećanjem dubine opada intenzitet sila koje se stvaraju u zglobovima. Uređaj pokazuje bolju učinkovitost pri manjim valovima, dok s porastom valnih perioda opada količina apsorbirane energije. Također, istraženo je i dinamičko ponašanje pretvarača valova pod utjecajem

<sup>26</sup> <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/20455934>

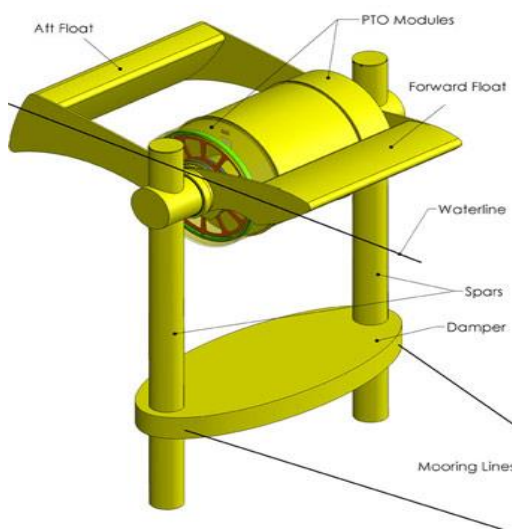


nepravilnih valova koje je pokazalo bolje performanse u odnosu na regularne valove.<sup>27</sup> Prema procjeni iz 2004 godine, cijena uređaja iznosi 2 do 3 milijuna američkih dolara.<sup>28</sup>

Columbia Power Technologies razvila je uređaj StringRAY, uređaj namijenjen za proizvodnju električne energije u dubinama većim od 60 metara. Sastoji se od cilindričnog tijela, plovaka i poluga koji neovisno reagiraju na oblik morskog vala koji prolazi. Svaki plovak izravno je spojen pogonskom osovinom na vlastiti rotacijski generator. Dva generatora smještena su unutar gondole blizu vrha okomitih poluga.<sup>29</sup> Nazivna snaga uređaja iznosi 500 kW.

Vertikalni pomaci plovka uzrokovani horizontalnim kretanjem valova okreću generator u neprekidno u oba smjera. Poluge se povezuju s prigušivačem ispod morske površine te su spojene sustavom privezivanja u jednoj točki sa podstanicom na morskome dnu gdje se sakuplja proizvedena električna energija te prenosi na kopno i spaja na mrežu. Sustav privezivanja u jednoj točki omogućuje održavanje uređaja pod optimalnim kutom u odnosu na valove, te raspon kretanja od 360° kako bi se postigla najveća iskoristivost.

**Slika 12: StingRAY uslužni sustav za napajanje valovima**



Izvor: <https://www.asme.org/topics-resources/content/float-like-a-stingray-be-like-a-power-plant>

<sup>27</sup> Ghaneei, Hana and Mahmoudi, Mohmmadreza, Simulation, Optimization and Economic Assessment of Pelamis Wave Energy Converter (October 5, 2021).

<sup>28</sup> J.R. Joubert, J.L. van Niekerk, J. Reinecke I. Meyer, Wave Energy Converters (WECs), Centre for Renewable and Sustainable Energy Studies, 2013.

<sup>29</sup> <https://cpower.co/products/#stingray>

**Točkasti apsorberi** su pretvarači valne energije koji sakupljaju dolaznu valnu energiju iz svih smjerova. Postavljeni su na površini ili neposredno ispod površine. Okomito uronjeni plovak apsorbira energiju valova koju klip ili linearni generator pretvara u električnu energiju. Apsorberi s više točaka sastoji se od nekoliko plovaka na pokretnim krakovima. Energija gibanja krakova dodatno se prikuplja u zajednički hidraulički vod i pretvara u električnu energiju.<sup>30</sup> S obzirom na lokaciju točkasti apsorberi dijele se na uronjene ili plutajuće. Plutajući točkasti apsorberi sastoje se od oscilirajućeg plutajućeg tijela i PTO (eng. *Power take-off*) mehanizma koji je privezan ili usidren na morsko dno.

PowerBuoy PB3 usidreni je plutajući uređaj tvrtke Ocean Power Technologies, dizajniran kako bi se smanjili operativni troškovi u odobalnim operacijama. Sastoji se od plovka, poluge i sustava priveza (1 do 3 priveza, ovisno o dubini i uvjetima). Plovak se vertikalno pomiče po poluzi uslijed djelovanja valova dok se pretvorba energije valova provodi putem generatora s izravnim pogonom koji puni ugrađenu bateriju (eng. *Energy Storage System*).

Uređaj uz konstantnu opskrbu električnom energijom također omogućuje komunikaciju s udaljenim objektima na obali i prijenos podataka u stvarnom vremenu. Uređaj visine 13,3 metara, promjera plovka 2,65 metra i težine 8,3 tone dnevno prosječno može proizvesti 8,4 kWh snage. Pri testiranju uređaja kod obale New Jersey-a uređaj je izdržao udar uragana Irena. Godine 2020. kao nadopuna PB3 na tržištu je dostupan Hibrid PowerBuoy. Ključna razlika dvaju uređaja je način stvaranja snage, HPB umjesto gibanja valova posjeduje i solarne ploče.

**Slika 13: PowerBuoy PB3**



Izvor: <https://oceanpowertechnologies.com/platform/opt-pb3-powerbuoy/>

---

<sup>30</sup>[https://www.marinespecies.org/introduced/wiki/Wave\\_energy\\_converters#:~:text=Point%20absorber%20are%20buoy%2Dtype,or%20linear%20generator%20into%20electricity.](https://www.marinespecies.org/introduced/wiki/Wave_energy_converters#:~:text=Point%20absorber%20are%20buoy%2Dtype,or%20linear%20generator%20into%20electricity.)

Oscilla Powers-ov pretvarač energije valova temelji se na principu apsorbera s više točaka. Proizvodi dva sustava; Triton od 1 MW i Triton-C od 100 kW. Sastoji se od površinskog plovka i uronjenog generatora u obliku prstena koji su putem tri tanka fleksibilna kabela spojenih na plutajuću ploču.

Površinski plovak u mogućnosti je prikupiti energiju valova u svih šest stupnjeva slobode (uzdizanje, nagib, udar, kotrljanje i skretanje) što omogućuje veću proizvodnju energije.<sup>31</sup> Za pretvorbu mehaničke u električnu energiju koristi tri neovisna hidrostatska, hidraulička pogonska sklopa.

Predviđeno je da uređaj Triton-C bude postavljen i testiran u blizini Havaja. Oscilla Power's pretvarač energije valova Triton na mrežnoj skali (WEC) proglašen je jednim od TIME-ovih najboljih izuma za 2022. Za razliku od Tritona 1 MW, Triton-C je namijenjen opskrbi energijom udaljenim i izoliranim zajednicama koje trenutno imaju iznimno visoke troškove energije i nesigurnu energetska sigurnost.<sup>32</sup>

**Slika 14: Uređaj Triton-C**



Izvor: <https://www.oscillapower.com/triton-c>

<sup>31</sup> <https://www.oscillapower.com/technology>

<sup>32</sup> <https://www.oscillapower.com/triton-c>

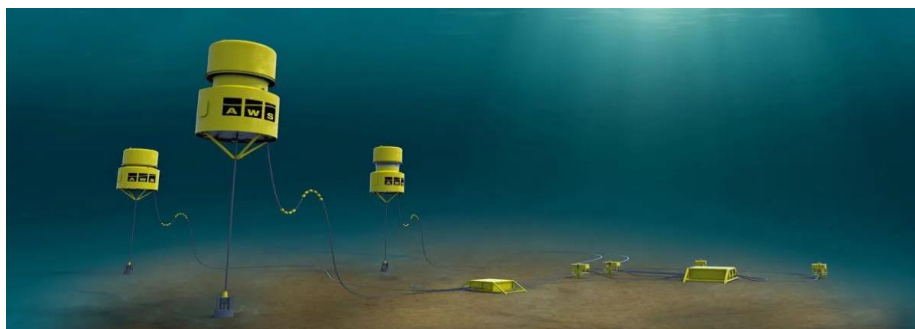
**Način rada pomoću diferencijalnih tlakova** je vrsta potopljenog točkastog apsorbira koji koristi razliku tlaka iznad uređaja između vrhova i dolina valova. Sastoji se od fiksirane cilindrične komore ispunjene zrakom na morskom dnu s pomičnim gornjim cilindrom. Dok brijeg vala prelazi preko pretvornika, tlak vode unutar uređaja komprimira zrak pomičući gornji cilindar prema dolje. Ukoliko se dol vala nađe iznad pretvornika tlak vode se smanjuje i gornji cilindar se podiže.<sup>33</sup> Pretvornik funkcionira na principu Arhimedovog zakona.

Archimedes Waveswing (*AWS*) je sustav dizajniran za opskrbu energijom u priobalnom području. Potopljena plutača s valovima reagira na promjene tlaka uzrokovane prolaznim valovima i pretvara rezultirajuće gibanje u električnu energiju putem generatora s izravnim pogonom. Sustav je prikladan za postavljanje u dubinama vode većim od 25 m kao jedna plutača ili za integraciju u strukturu s više apsorbira. Pojedinačna jedinica može se konfigurirati za snage između 15 kW i 500 kW, dok jedinica s više apsorbira može ponuditi do 10 MW s jedne platforme.

Uređaj snage 16 kW, težine 50 tona i visine 7 metara od siječnja 2022. godine nalazi se na testiranju u Europskom centru za pomorsku energiju (EMEC) u Orkney-u. Na mjestu testiranja tijekom razdoblja umjerenih uvjeta valova, prosječna dobivena snaga iznosila je preko 10 kW, a vršna vrijednost 80 kW.<sup>34</sup>

Istoimena tvrtka razvila je prototip AWS-III, skup međusobno povezanih fleksibilnih membranskih apsorbira s turbo-generatorskim setovima raspoređenih oko strukture u obliku katamarana.

**Slika 15: Archimedes Waveswing uređaj**



Izvor: <https://awsocan.com/our-technology/>

<sup>33</sup> Drew B, Plummer AR, Sahinkaya MN. A review of wave energy converter technology. Proc Inst Mech Eng Part A-J Power Energy 2010.

<sup>34</sup> <https://awsocan.com/2022/11/aws-waveswing-trials-exceed-expectations/>

**Uređaj za prelijevanje** sastoji se od dugačkih struktura koje omogućavaju kretanje valova da napune spremnik do razine koja je viša od razine okolnog mora. Razlike tlakova morske vode u spremniku i vanjske površine mora guraju vodu kroz niskonaponsku turbinu spojenu s generatorom gdje se proizvodi električna energija.<sup>35</sup>

Wave Dragon je plutajući pretvarač energije valova s labavim usidrom tipa prelijevanja. U osnovi se sastoji od dva reflektora valova koji usmjeravaju valove prema rampi. Iza rampe nalazi se veliki spremnik u koji se sakuplja i privremeno skladišti voda koja teče uz rampu. Voda napušta akumulaciju kroz hidro turbine koje iskorištavaju visinu između razine akumulacije i razine mora.

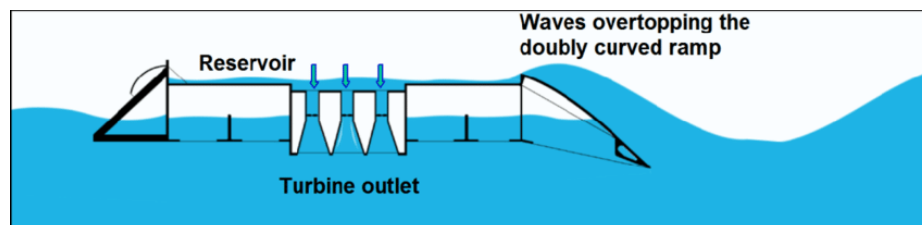
Glavne komponente Wave Dragona su:

1. Platforma od armiranog betona i/ili čelika s plutajućim rezervoarom
2. Dvostruko zakrivljena rampa i reflektor valova
3. Sustav privezivanja
4. Propelerske turbine, generator s permanentnim magnetima

Jedna od ključnih značajki Wave Dragona je prilagodba promjenjivim visinama valova promjenom vlastite plutajuće visine, što se postiže promjenom tlaka zraka u otvorenim komorama.<sup>36</sup>

Dvostruko zakrivljena rampa uz pomoć reflektora valova povećava količinu vode koja se preljeva u uređaj. Reflektori valova sustavom za privez i dodatnim ojačanjem pričvršćeni su za tijelo uređaja kako bi se apsorbirale preostale sile između njih nalaze se gumeni bokobrani.

**Slika 16: Wave Dragon**



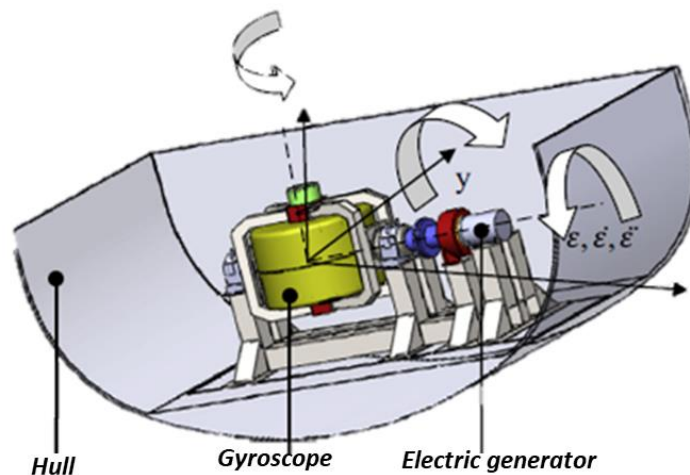
Izvor: [https://www.researchgate.net/figure/Working-principle-of-the-Wave-Dragon-wave-energy-converter\\_fig6\\_274444733](https://www.researchgate.net/figure/Working-principle-of-the-Wave-Dragon-wave-energy-converter_fig6_274444733)

<sup>35</sup><https://tethys.pnnl.gov/technology/wave#:~:text=Wave%20energy%20technologies%2C%20also%20known,m odular%20and%20deployed%20in%20arrays.>

<sup>36</sup> <http://wavedragon.net/specifications/>

ISWEC (Inertial Sea Wave Energy Converter) je sustav koji proizvodi električnu energiju zbog prisutnosti jedne ili više žiroskopskih grupa koje, putem sprege između dinamičkog nagiba trupa i rotacijskog gibanja zamašnjaka, generiraju žiroskopske sile koje se pretvaraju u električnu energiju pomoću priključnog vratila (*Power Take-Off*).<sup>37</sup> Dizajn je moguće optimizirati s obzirom na meteorološko-oceanske uvjete mjesta na kojem je instaliran pomoću genetskog algoritma.

**Slika 17: ISWEC**



Izvor: <http://www.moreenergylab.polito.it/iswec/#:~:text=ISWEC%2C%20acronym%20of%20Inertial%20Sea,via%20the%20coupling%20between%20hull's>

Energetska tvrtka Eni je u suradnji s Politecnico di Torino i Wave for Energy instalirao prvi ISWEC uređaj na svijetu u ožujku 2023. godine. Nalazi se u blizini obale Talijanskog otoka Pantelleria, a povezan s električnom mrežom otoka. Uređaj se sastoji od čeličnog trupa dimenzija 8x15 m u kojem se nalazi uređaj za pretvorbu energije koji se sastoji od dvije žiroskopske jedinice promjera većeg od 2 m. Uređaj se nalazi na morskom dnu dubine 35 m pomoću posebnog sustava za privez koji se sastoji od tri priveza i zakretnice. Prosječna gustoća snage valova u Pantelleriji iznosi 5,6 kW/m, a nazivna snaga ISWEC-a kada je spojen na električnu mrežu iznosi 30 kW.<sup>38</sup>

<sup>37</sup><http://www.moreenergylab.polito.it/iswec/#:~:text=ISWEC%2C%20acronym%20of%20Inertial%20Sea,via%20the%20coupling%20between%20hull's>

<sup>38</sup> <https://www.eni.com/en-IT/operations/iswec-eni.html>



**Slika 18: ISWEC uređaj postavljen u blizini obale Talijanskog otoka Pantelleria**



Izvor: <https://www.eni.com/en-IT/operations/iswec-eni.html>

### 3.1.2. Sustavi ovisni o smjeru vala

U sustavu za pretvorbu energije koji koristi **završnike** glavna os okomita je na smjer kretanja vala. Uređaji se sastoje od nepomične komponente pričvršćene na morsko dno ili obalu i vertikalno pomične komponentne. Vertikalno kretanje pomične komponente uzrokuje stvaranje tlaka ulja ili zraka u hidrauličkom cilindru koji pokreće turbinu za proizvodnju električne energije.

Cycloidal Wave Energy Converter (*CycWEC*) potpuno je potopljeni uređaj koji pomoću hidrokrlaca vrši izravnu pretvorbu snage vala u snagu osovine koja se pomoću izravnog generatora pretvara u električnu energiju.

Valovi koji prolaze uzrokuju brzinu u radijalnom smjeru koja se zajedno s rotacijskom brzinom hidrogliisera približava krilu, Zbog ove kombinirane brzine, hidrogliiser proizvodi uzgon. Hidrokrlci kreću se brzinom većom od tekućine iz koje izvlače snagu, a budući da se hidrodinamičke sile kvadratno povećavaju s brzinom, povećanje rotacijske brzine omogućuje smanjenje veličine uređaja ako se pretvaraju jednake količine snage.

Uređaj CycWEC s generatorom 2,5 MW u području s prosječnom godišnjom snagom valova 30kW/m pretvara prosječno 38% energije valova u električnu energiju i proizvodi

oko 5,4GWh godišnje. Obalna naseljena središta napajaju se energijom po cijeni od 0,06 USD po KWh.<sup>39</sup>

**Slika 19: CycWEC**



Izvor: <https://atargis.com/CycWEC.html>

Točkasti apsorber tvrtke Eco Wave Power sastoji se od plovaka pričvršćenih na kopno pomoću robusnih mehaničkih ruku. Kretanje valova uzrokuje gibanje plovaka koje uzrokuje komprimiranje i dekomprimiranje hidrauličkih klipova koji prenose tekućinu u akumulatore. Akumulator pohranjuje stlačenu tekućinu koja pokreće hidraulički motor. Moment rotacije prenosi se na generator koji isti pretvara u električnu energiju. Nakon dekompresije tekućina se vraća u spremnik gdje je ponovno koriste klipovi stvarajući zatvoreni kružni sustav. Hidraulička tekućina koju koristi Eco Wave Power biorazgradiva je i sigurna za okoliš kako se u slučaju oštećenja i izlivanja ne bih prouzročilo onečišćenje. Sustav počinje s proizvodnjom električne energije od visine vala od 0,5 metara.

U Gibraltaru je 2016. godine postavljena instalacija kapaciteta 100 kW, koja bi nakon proširenja na 5000 kW snage trebala osigurati do 15% energetske potrebe na tom području. Tijekom razdoblja od kolovoza 2020. do srpnja 2021. tvrtka je uspjela doseći 73% predviđene raspoložive energije na toj lokaciji, što je značajno poboljšanje u odnosu na 30% u paralelnom razdoblju 2017.-2018.<sup>40</sup>

---

<sup>39</sup> <https://atargis.com/>

<sup>40</sup> <https://www.offshore-energy.biz/eco-wave-power-to-relocate-wave-energy-plant-from-gibraltar-to-l-a/>



**Slika 20: EcoWave Power fiksirani točkasti apsorber valova**



Izvor: <https://www.ecowavepower.com/pecem-complex-and-eco-wave-power-sign-memorandum-of-understanding-for-the-implementation-of-ewps-wave-energy-power-station/>

**Prenaponski pretvarač oscilirajućeg vala** tehnologija je iskorištavanja gdje se energija prikuplja iz relativnog gibanja tijela, potaknutog horizontalnim gibanjem valova do fiksne točke. Dizajnirani su na način da je jedan kraj kraj pričvršćen za pod-konstrukciju ili morsko dno, dok se drugi kraj može slobodno pomicati. Ova vrsta pretvarača može biti u obliku plovka, zaklopki ili membrana.<sup>41</sup>

Kako bi se osigurao učinkoviti rad uređaja, horizontalno gibanje čestica potrebno je pretvoriti u vertikalno, što se postiže nagibom vodenog stupca pod kutom u odnosu na horizontalu. Oscilacije vodene površine kroz zatvoreni prostor uzrokuju protok zraka kroz zračnu turbinu.

Tehnologija prenapenskog pretvarača oscilirajućih valova razvijena je analizom performansi LIMPET obalnog oscilirajućeg vodenog stupca. Rezultati analize pokazali su nelinearnost hidrodinamike pretvarača i kvalitativno drugačiji odgovor od uređaja koji su smješteni na dubljim područjima (smanjenje performansi prilikom smanjenja dubine vode).<sup>42</sup>

Wave Roller potopljeni prenaponski je pretvarač oscilirajućih valova usidren na morsko dno. Sastoji se od temelja, pomične ploče i PTO-a. Temelj se sastoji od betonske strukture s odjeljcima napunjenih vodom koji omogućuju da uređaj ostane nepomičan. Glavna komponenta je pomična ploča uronjena i postavljena na dubinama od 8 do 20 metara gdje su

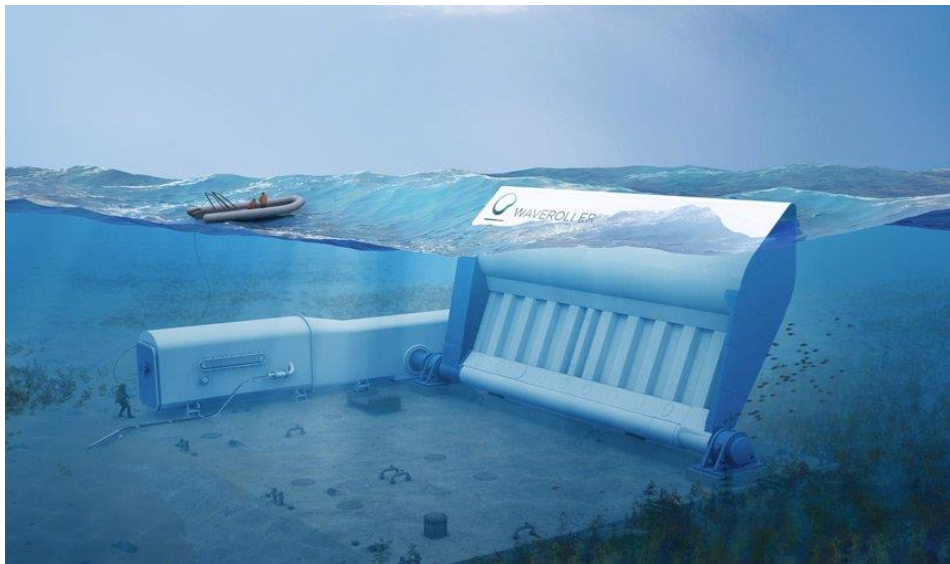
<sup>41</sup> <https://tethys-engineering.pnnl.gov/technology/oscillating-wave-surge-converter>

<sup>42</sup> Folley, Matt & Whittaker, Trevor & Osterried, Max. (2004). The Oscillating Wave Surge Converter. Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference.

valovi najsnažniji, kako bi se omogućila najveća moguća apsorpcija iz valova. Ploča prekriva većinu vodenog stupca, a kreće se naprijed-natrag u skladu s horizontalnim kretanjem čestica vode. Jedna ploča proizvede između 1,5 i 2 MW snage iz valova.<sup>43</sup> Hidrauličke klipne pumpe spojene na ploču pumpaju tekućinu unutar hermetički zatvorenog kruga. Tekućina se pod visokim tlakom odvodi u hidro-motor koji pokreće generator električne energije koja se podvodnim kabelom prosljeđuje u mrežu.

Jedna WaveRoller jedinica je ocijenjena na između 350kW i 1000kW, s faktorom kapaciteta od 25-50%, ovisno o uvjetima valova na mjestu projekta.<sup>44</sup> Ujednačena cijena energije (eng. LcOE - Levelized Cost of Energy) na temelju izravnih povratnih informacija od proizvođača s izvorne lokacije studije slučaja u Penicheu procijenjena je na 125 €/MWh.<sup>45</sup> Također, WaveRoller posjeduje certifikat tehnološke kvalifikacije od Lloyds Registra u području energije oceana. Smješten u zaštićenom području NATURA 2000, projekt je uspješno završio opsežne studije okoliša i aktivnosti praćenja. Projekt financiraju privatni investitori, Tekes (Finska agencija za financiranje inovacija) i bankovni zajam Europske investicijske banke (EIB).

**Slika 21: Wave Roller**



Izvor: <https://aw-energy.com/waveroller/>

<sup>43</sup> [https://www.renewableenergymagazine.com/ocean\\_energy/awenergy-s-waveroller-issued-a-manufacturing-certificate-20190501](https://www.renewableenergymagazine.com/ocean_energy/awenergy-s-waveroller-issued-a-manufacturing-certificate-20190501)

<sup>44</sup> <https://aw-energy.com/waveroller/>

<sup>45</sup> D. Clemente, P. Rosa-Santos, T. Ferradosa, F. Taveira-Pinto, Wave energy conversion energizing offshore aquaculture: Prospects along the Portuguese coastline, *Renewable Energy*, Volume 204, 2023, Pages 347-358

**Oscilirajući vodeni stupac** koristi zračnu turbinu smještenu u kanalu iznad površine vode. Baza uređaja otvorena je prema moru, te na taj način upadni valovi tjeraju vodu unutar stupca da oscilira u okomitom smjeru, zbog čega se zrak iznad površine vode u stupcu kreće u fazi sa slobodnom površinom vode unutar stupca i pokreće zračnu turbinu.<sup>46</sup>

Upotreba tehnologije oscilirajućeg vodenog stupca (eng. *Oscillating water column-OWC*) konstruiranom kao plutačom za zvučno upozorenje u navigaciji započela je u devetnaestom stoljeću na području SAD-a. Upotreba ove tehnologije za iskorištavanje energije valova započela je 1947. u japanskom zaljevu Osaka. Sustav je bio dizajniran na način da OWC pokreće impulsnu turbinu proizvodeći električnu energiju koja napaja navigacijska svjetla. Od kraja devetnaestog stoljeća do danas izgrađeni su i testirani razni obalni i odobalni uređaji diljem svijeta.<sup>47</sup>

Bitni elementi prilikom dizajniranja OWC-a<sup>48</sup>:

1. Zračna komora unutar kućišta mora biti projektirana imajući na umu valni period, značajnu visinu vala i karakteristike valne duljine lokalne oceanske klime.
2. Ukoliko kućište nije odgovarajuće veličine, valovi bi mogli rezonirati unutar zračne komore što uzrokuje neto nulti prolaz zraka kroz turbinu
3. Zračna komora mora biti pogodnog oblika za strujanje zraka kroz turbinu (sužavanje komore od razine vode do turbine)

Tehnologija oscilirajućeg vodenog stupca može se koristiti plutajući na otvorenom moru, fiksirana na obali ili lukobranu. Struktura postavljena na obali sastoji se od djelomično uronjene komore koja je izravno pričvršćena na stijenu i turbine koja se nalazi na izlazu. Izgrađena struktura postavljena je okomito na valove, a dio morske vode nalazi se unutar komore ispod morske površine.

Svaka djelomično uronjena komora ima veliki otvor na ulazu, ispod morske površine i mali otvor na vrhu odnosno izlazu gdje je smještena turbina. Upadni valovi kreću se vertikalno gore-dolje istiskujući zrak iznad površine gurajući ga naprijed-natrag. Prilikom svake kretnje zrak se komprimira i dekomprimira. Razlika tlakova pokreće turbinu koja se nalazi na vrhu komore čime nastaje mehanička energija koja se pomoću generatora pretvara u električnu

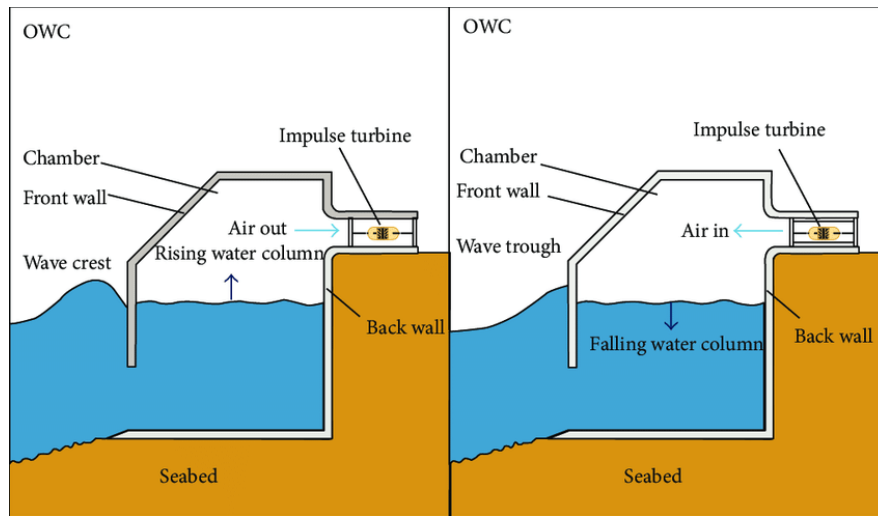
---

<sup>46</sup> S.C. Bhatia, 13 - Tide, wave and ocean energy, Editor(s): S.C. Bhatia, Advanced Renewable Energy Systems, Woodhead Publishing India, 2014, Pages 307-333.

<sup>47</sup> <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsta.2011.0164#d1383281e493s>

<sup>48</sup> [https://diving-rov-specialists.com/index\\_htm\\_files/os-65-ocean-wave-energy-conversion.pdf](https://diving-rov-specialists.com/index_htm_files/os-65-ocean-wave-energy-conversion.pdf)

**Slika 22: Tehnologija oscilirajućeg vodenog stupca**



Izvor: [https://www.researchgate.net/figure/Schematic-layout-of-oscillating-water-column-OWC-system\\_fig2\\_276915186](https://www.researchgate.net/figure/Schematic-layout-of-oscillating-water-column-OWC-system_fig2_276915186)

Europska komisija 1991. godine donijela je odluku o uključivanju energije valova u program istraživanja i razvoja obnovljivih izvora energije koja je potaknula izradu temeljnih studija, praćenih projektiranjem i izgradnjom dva OWC postrojena s fiksnom strukturom (tzv. Europska pilot postrojenja) na otoku Pico, Azori, Portugal i otoku Islay, Škotska, Velika Britanija. Oba postrojenja bila su opremljena Wellsovima turbinama.

Većina dosad testiranih prototipa za pretvorbu energije valova koristeći tehnologiju oscilirajućeg vodenog stupca opremljene su samoispravljajućim zračnim turbinama s aksijalnim protokom, a najčešće korištene turbine su Wellsova turbina, impulsna turbina i Denniss-Auld turbina.

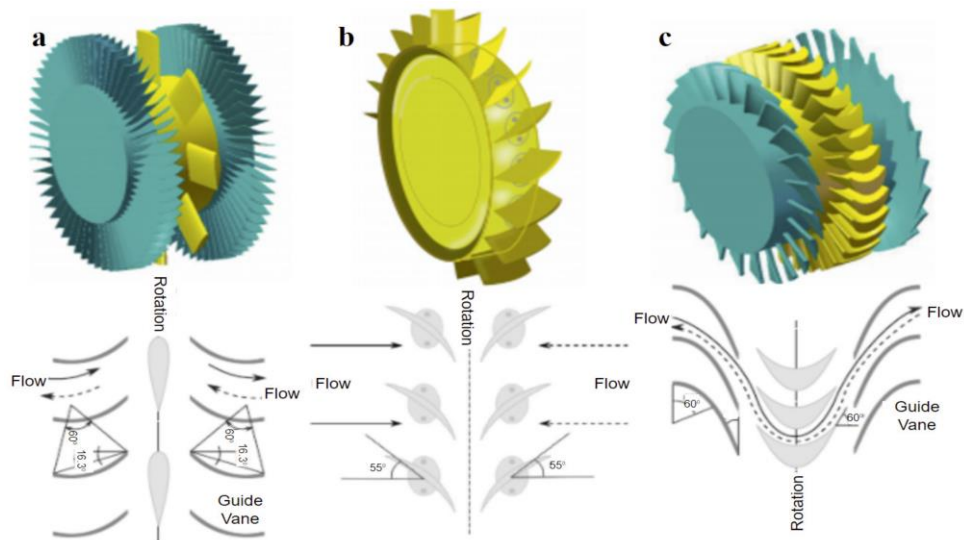
Wellsova turbina sastoji se od fiksnih lopatica, a bez obzira na smjer strujanja zraka u stupcu okreće se u istom smjeru. Turbina radi na principu pretvaranja kinetičke energije iz obrnutog protoka zraka, a koristi se za pogon električnog indukcijskog generatora. Povećanje brzine protoka zraka kroz turbinu moguće je postići na način da površina poprečnog presjeka kanala bude manja od presjeka morskog stupca.<sup>49</sup>

<sup>49</sup> <https://www.alternative-energy-tutorials.com/wave-energy/wave-energy-devices.html>

Deniniss-Auld turbina sastoji se od lopatica s promjenjivim korakom koji se mogu kontrolirati kako bi se održao konstantan smjer vrtnje generatora i suženim poprečnim presjekom kako se približava turbini u svrhu postizanja veće učinkovitosti iskorištavanja.

Biradijalne impulsne turbine mogu biti izvedene s aksijalno klizećim vodećim lopaticama ili fiksnim lopaticama. Nedostatak aksijalne impulsne turbine su veliki aerodinamički gubici koji nastaju zbog prevelikog upadnog kuta strujanja na ulazu u drugi red vodećih lopatica. Iako je radni raspon protoka impulsne turbine širi u usporedbi s onim Wellsove turbine, njezina vršna učinkovitost jedva prelazi 50%.<sup>50</sup>

**Slika 23: Prikaz najčešće korištenih turbina**



Izvor: Prasad, K.A.; Chand, A.A.; Kumar, N.M.; Narayan, S.; Mamun, K.A. A Critical Review of Power Take-Off Wave Energy Technology Leading to the Conceptual Design of a Novel Wave-Plus-Photon Energy Harvester for Island/Coastal Communities' Energy Needs. *Sustainability* 2022

<sup>50</sup> Portillo Juan, N.; Negro Valdecantos, V.; Esteban, M.D.; López Gutiérrez, J.S. Review of the Influence of Oceanographic and Geometric Parameters on Oscillating Water Columns. *J. Mar. Sci. Eng.* 2022, 10, 226.

## 4. MOGUĆNOSTI ISKORIŠTAVANJA ENERGIJE VALOVA NA PODRUČJU REPUBLIKE HRVATSKE

Kroz analizu dostupnih podataka, istraživanjem će se procijeniti potencijalna snaga energije valova na odabranoj lokaciji i identificirati najpogodnija vrsta tehnologije. Za analizu su korišteni parametri valova iz baze World Wave Atlas. Podaci su dobiveni putem satelitskog visinomjera, a potvrđuju se mjerenjima plutača.

**Tablica 1: Parametri vala World Wave Atlas<sup>51</sup>**

<b>Značajna visina valova</b>	$H_s, m$
<b>Srednji smjer vala</b>	$\vartheta, ^\circ$
<b>Vršni period 1d spektra</b>	$T_p, s$
<b>Srednji valni period/energetski period</b>	$T_e, s$
<b>Značajna valna visina valova vjetra</b>	$H_{sw}, m$
<b>Srednji smjer valova vjetra</b>	$\vartheta_w, ^\circ$
<b>Srednje razdoblje valova vjetra</b>	$T_{ew}, s$
<b>Značajna valna visina primarnog nabujalog vala</b>	$T_{es}, s$
<b>Srednji smjer primarnog nabujalog vala</b>	$H_{ss}, m$
<b>Srednje razdoblje primarnog nabujalog vala</b>	$\vartheta_s, ^\circ$
<b>Brzina vjetra na 10 m visine</b>	$V_{w10}, m/s$
<b>Smjer vjetra na 10 m visine</b>	$\vartheta_{w10}, ^\circ$

Za izračun godišnjeg energetskog potencijala na određenoj lokaciji potrebno je izraditi dijagram raspršenja valova. Dijagram raspršenja je prikaz statističkih podataka o valovima na određenom području tijekom određenog vremenskog razdoblja, a rezultat je dugotrajnih promatranja i analize prikupljenih podataka. Dijagram se sastoji od dvije varijable; visine vala ( $H_s$ ) i perioda vala ( $T_s$ ). Vjerojatnost određenog stanja mora u dijagramu raspršenosti valova može se opisati zajedničkom funkcijom gustoće vjerojatnosti.<sup>52</sup>

<sup>51</sup> A. Farkas, N. Degiuli, I. Martić, „Assessment of Offshore Wave Energy Potential in the Croatian Part of the Adriatic Sea and Comparison with Wind Energy Potential”, Energies an open access journal from MDPI, 2019.

<sup>52</sup> M. Deelen, J B de Jonge, An operational based method for determining the design sea states of heavy transport vessels, Marine Heavy Transport & Lift IV, 29-30 October, London, UK

Za dobivanje podataka o proizvedenoj snazi i faktoru kapaciteta potrebno je povezati dijagram raspršenja valova i matricu snage uređaja.

Matrica snage uređaja za iskorištavanje energije valova, poznata i kao PTO (Power Take-Off) matrica, koristi se za prikaz energetske karakteristike uređaja za iskorištavanje energije valova. Ova matrica omogućuje analizu performansi uređaja, kao i izračunavanje snage koju uređaji mogu generirati. Kako bi se izradila matrica snage potrebni su podaci o karakteristikama uređaja. Prilikom izrade matrica snage često se koriste računalni softveri i simulacijski alati. Neki od popularnih softvera u ovom području su MATLAB i PSpice.

Iz konačne matrice pomoću sljedeće formule izračunavaju se vrijednosti godišnje proizvodnje električne energije ( $PE$ ):

$$PE = \sum_{i=1}^{nTE} \sum_{j=1}^{nHs} p_{ij} P_{ij}$$

- $p_{ij}$  predstavlja podatke prikazane u matrici dijagrama raspršenja
- $P_{ij}$  predstavlja podatke prikazane u matricama snage određenih WEC uređaja

Vrijednosti  $P_{ij}$  prikazani su u matricama snage određenih WEC-ova.

Nakon izračuna podataka o godišnjoj proizvodnji, može se izračunati prosječna proizvodnja ( $PE_{average}$ ) putem sljedeće formule<sup>53</sup>:

$$PE_{average} = \frac{Pe}{t}$$

- gdje  $PE$  predstavlja prosječnu električnu snagu, a  $t$  broj sati u godini (8760 sati).

Učinkovitost pretvarača energije valova definira se kroz faktor kapaciteta ( $C_f$ ) sljedećom formulom:

$$C_f = \frac{Pe_{average}}{R_p} * 100$$

- gdje podatak  $R_p$  predstavlja nazivnu snagu određenog pretvarača

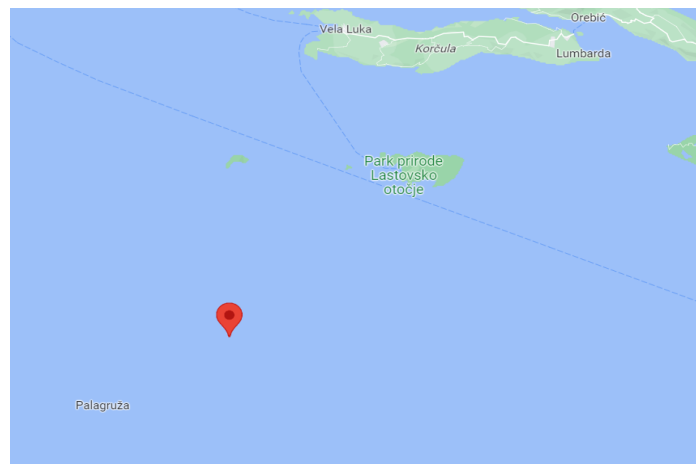
---

<sup>53</sup> Ibid

#### 4.1. PODACI ZA ODABRANU LOKACIJU

Otoci, zbog svoje izoliranosti i ograničenog pristupa konvencionalnim izvorima energije, predstavljaju idealno područje za implementaciju tehnologija za iskorištavanje energije valova. U ovom radu biti će istražena lokacija koja se nalazi na koordinatama 42,5°N 16,5°E, a koja se nalazi jugozapadno od otoka Lastova. Za odabranu lokaciju u periodu od srpnja 1992. do siječnja 2016. godine dobiveno je 33913 podataka.

**Slika 24: Lokacija 42,5°N 16,5°E**



Izvor: Google Mape

U sljedećoj tablici dani su parametri klime valova na odabranoj lokaciji za sezonsku i godišnju razinu.

**Tablica 2: Parametri klime valova**

	<i>Proljeće</i>	<i>Ljeto</i>	<i>Jesen</i>	<i>Zima</i>	<i>Godišnje</i>
<i>HS, m</i>	0,786	0,630	1020	1088	0,879
<i>σHS, m</i>	0,515	0,354	0,689	0,704	0,611
<i>TE, s</i>	3714	3395	4074	4157	3832
<i>σTE, s</i>	0,941	0,774	1087	1076	1023
<i>P, kW/m</i>	1994	1007	3851	4320	2782

Izvor: Farkas, A.; Degiuli, N.; Martić, I. Assessment of Offshore Wave Energy Potential in the Croatian Part of the Adriatic Sea and Comparison with Wind Energy Potential. *Energies* 2019



Srednja godišnja vrijednost značajne visine vala ( $H_s$ ) nalazi se u rasponu od 0,63 do 1,088 m, dok se standardna devijacija ( $\sigma H_s$ ) kretala u rasponu od 0,345 do 0,704 m. Srednja godišnja vrijednost valnog perioda ( $T_e$ ) iznosila je 3832 s, a standardna devijacija ( $\sigma T_e$ ) kretala se u rasponu od 0,941 do 1087 s. Najveće vrijednosti snage ( $PE$  average) dobivene su u zimskom periodu, a iznosila je 4320 kW/m, dok je najniža ljeti iznosila 1007 kW/m.

**Tablica 3: Dijagram raspršenja valova na odabranoj lokaciji**

HS/TP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	UKUPNO
<b>0.5</b>	0	0	4934	3552	589	260	166	93	28	11	4	8	14	4	9663
<b>1</b>	0	0	1666	6815	3800	1114	326	103	68	29	8	3	0	1	13933
<b>1.5</b>	0	0	14	861	2616	1533	459	138	36	14	4	4	1	0	5680
<b>2</b>	0	0	0	20	666	1256	445	159	44	10	2	1	0	0	2603
<b>2.5</b>	0	0	0	0	36	500	393	128	54	13	0	0	0	0	1124
<b>3</b>	0	0	0	0	0	113	255	111	38	11	1	0	0	0	529
<b>3.5</b>	0	0	0	0	0	5	70	91	38	10	0	0	0	0	214
<b>4</b>	0	0	0	0	0	0	14	51	22	7	0	0	0	0	94
<b>4.5</b>	0	0	0	0	0	0	3	21	12	2	0	0	0	0	38
<b>5</b>	0	0	0	0	0	0	0	7	5	1	0	0	0	0	13
<b>5.5</b>	0	0	0	0	0	0	0	1	1	4	0	0	0	0	6
<b>6</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	2
<b>6.5</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
<b>UKUPNO</b>	0	0	6614	11248	7707	4781	2131	903	348	113	19	16	15	5	33900

Izvor: A. Farkas, N. Degiuli, I. Martić, „Assessment of Offshore Wave Energy Potential in the Croatian Part of the Adriatic Sea and Comparison with Wind Energy Potential”, Energies an open access journal from MDPI, 2019.

Iz tablice gore vidljivo je da je ukupan broj izlaznih podataka 33900, te da je većina značajnih visina valova manja od 1m. Značajne visine vala ( $H_s$ ) podjeljene su u rasponu 0-6,5 m, dok je vršni period ( $T_p$ ) podijeljen u rasponu od 0-14 sek.

## 4.2. IZRAČUN OČEKIVANE PROIZVODNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE

U analizi su, radi dostupnosti podataka korišteni sljedeći uređaji: AWS (Archimedes Waveswing) 2470 kW, AquaBuoy 250 kW, WaveDragon 7000 kW i 5900kW. Parametri u matricama za značajne visine valova ( $H_s$ ) pri određenom valnom periodu ( $T_p$ ) dani su u kW.

U tablici 4 gdje je prikazana matrica AWS uređaja snage 2470 kW vidljivo je da izlazna snaga raste zajedno s visinom i periodom vala.

**Tablica 4: Matrica snage uređaja AWS 2470 kW dana u kW**

HS/TP	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	0	2	13	26	41	58	81	105	131	153	183
1.5	0	4	28	56	85	121	173	226	266	309	357
2	0	8	49	100	15	210	292	366	418	482	543
2.5	0	15	78	159	234	320	438	531	603	675	741
3	0	25	111	227	339	453	600	722	827	897	945
3.5	0	35	115	305	454	605	772	913	1036	1119	1163
4	0	35	194	380	542	776	961	1103	1227	1316	1365
4.5	0	0	235	479	722	957	1168	1320	1449	1547	1590
5	0	0	280	592	899	1144	1380	1569	1691	1785	1807
5.5	0	0	320	641	1033	1331	1568	1778	1919	1977	1994

Izvor: Pacaldo, J.C.; Bilgera, P.H.T.; Abundo, M.L.S. Nearshore Wave Energy Resource Assessment for Off-Grid Islands: A Case Study in Cuyo Island, Palawan, Philippines. Energies 2022

Tehnički podaci AWS uređaja<sup>54</sup>:

- Nazivni kapacitet (ovisno o klimi valova): >1.2 MW
- Promjer plovka: 9,5m
- Dubina mora: 40 – 100m
- Linearni generator kao PTO
- Procjena troškova: 4-6 milijuna dolara

<sup>54</sup> James R Joubert, Johannes L van Niekerk, Josh Reinecke, Imke Meyer, Wave Energy Converters (WECs), Centre for Renewable and Sustainable Energy Studies, October 2013

**Tablica 5: Matrica snaga uređaja AquaBuoy 250 kW dana u kW**

<b>HS/TP</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>
<b>1</b>	0	8	11	12	11	10	8	7	0
<b>1.5</b>	13	17	25	27	26	23	19	15	12
<b>2</b>	24	30	44	49	47	41	34	28	23
<b>2.5</b>	37	47	69	77	73	64	54	43	36
<b>3</b>	54	68	99	111	106	92	77	63	51
<b>3.5</b>	0	93	135	152	144	126	105	86	70
<b>4</b>	0	0	122	176	198	188	164	137	91
<b>4.5</b>	0	0	223	250	239	208	173	142	115
<b>5</b>	0	0	250	250	250	250	214	175	142
<b>5.5</b>	0	0	250	250	250	250	250	211	172

Izvor: Castro-Santos, L.; Bento, A.R.; Guedes Soares, C. The Economic Feasibility of Floating Offshore Wave Energy Farms in the North of Spain. *Energies* 2020

Tehnički podaci AquaBuoy plutače<sup>55</sup>:

- Nazivna snaga: 250kW
- Prosječna snaga: 56kW
- Promjer plutače: 6m
- Gaz: 30m
- Dubina mora: >50m
- Izvod snage: niskotlačna hidraulika
- Ukupni trošak: 3 milijuna dolara za 4 jedinice.

Proizvođač također navodi faktor kapaciteta od približno 12% (pod pretpostavkom klime valova od 25 kW/m). Predviđa se da bi faktor kapaciteta od oko 40% mogao osigurati gotovo optimalnu ekonomsku vrijednost električne energije za ovaj tip uređaja.

---

<sup>55</sup> ibid

**Tablica 6: Matrica snage uređaja Wave Dragon 5900 kW dana u kW**

HS/TP	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	160	250	360	360	360	360	360	360	320	280
2	640	700	840	900	1190	1190	1190	1190	1070	830
3	0	1450	1610	1750	2000	2620	2620	2620	2360	1840
4	0	0	2840	3220	3710	4200	5320	5320	4430	3440
5	0	0	0	4610	5320	6020	7000	7000	6790	5250
6	0	0	0	0	6720	7000	7000	7000	7000	6860

Izvor: Pacaldo, J.C.; Bilgera, P.H.T.; Abundo, M.L.S. Nearshore Wave Energy Resource Assessment for Off-Grid Islands: A Case Study in Cuyo Island, Palawan, Philippines. Energies 2022

**Tablica 7: Matrica snage uređaja Wave Dragon 7000 kW dana u kW**

HS/TP	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	203	348	516	699	896	953	962	919	820	663	446
1.5	412	485	750	1049	1375	1491	1527	1477	1332	1086	737
2	621	621	983	1398	1854	2029	2092	2034	1844	1509	1028
2.5	1123	1123	1304	1914	2602	2903	3041	2993	2743	2266	1555
3	1624	1624	1624	2430	3350	3776	3989	3951	3641	3022	2082
3.5	2581	2581	2581	2984	4191	4796	4945	4945	4765	3983	2761
4	3538	3538	3538	3538	5032	5816	5900	5900	5889	4943	3439
4.5	4719	4719	4719	4719	5466	5858	5900	5900	5895	5422	4222
5	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5004
5.5	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5452
6	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900
6.5	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900
7	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900

Izvor: Ibid.

Tehnički podaci Wave Dragona:

- Kapacitet: 4-7MW
- Širina: 260-300m
- Dužina: 170m
- Dubina mora: >25m

Nakon poznatih podataka potrebno je povezati dijagram raspršenja valova i matricu snage uređaja. Dijagram raspršenja valova i matrica snage su dva različita alata koji se koriste u analizi energije valova. Kombiniranje ove dvije analitičke metode može pomoći u razumijevanju karakteristika valova, identifikaciji trendova i pružiti korisne informacije za planiranje i projektiranje sustava iskorištavanja energije valova. Pomoću dijagrama raspršenja pokazuje se promjena visine valova u vremenskim intervalima, dok matrica snage može pružiti informacije o dominantnim frekvencijama i snazi valova u tim vremenskim intervalima za određeni uređaj.

Zbog različitih raspona značajne visine ( $H_s$ ) u tablicama snage pojedinih uređaja i podataka dobivenih na odabranoj lokaciji nije moguće potpuno povezati sve podatke. Povezivanjem dijagrama raspršenja valova i matrica snage dobivene su sljedeće vrijednosti:

**Tablica 8: Dobivene vrijednosti snaga i faktora kapaciteta**

	AWS	AQUABUOY	WAVEDRAGON 7000	WAVEDRAGON 5900
<b><i>PE</i></b>	1140 KWh	340,7 KWh	4239 KWh	2,2 GWh
<b><i>PE, average</i></b>	330,2 kWh	38,9 kWh	484,01 kWh	2523,91 kWh
<b><i>Cf (%)</i></b>	5,27	15,56	12,1	42,77

Izradila autorica

Oznaka *PE* u tablici gore predstavlja godišnju proizvodnju električne energije, *PE average* prosječnu godišnju proizvodnju, dok oznaka *Cf* predstavlja faktor kapaciteta kroz koje se definira korisnost uređaja.

Većina podataka o valovima na odabranoj lokaciji nižih je vrijednosti  $H_s$  i  $T_e$  nego većina uređaja za koje je moguće pronaći podatke o matricama snage. S obzirom na dobivene niske faktore kapaciteta ( $C_f$ ) na odabranoj lokaciji, može se zaključiti da su potrebni manji uređaji koji proizvode više energije na manjim visinama vala, odnosno da bi uređaje koji su predmet istraživanja trebalo skalirati. Kada bi se uređaji skalirali, vrijeme mirovanja bilo bi smanjeno, što bi rezultiralo većim faktorima kapaciteta i boljoj prikladnosti uređaja lokaciji.

Budući da otok Palagruža nema stanovništva, godišnje potrebe za električnom energijom su niske. Električna energija na otoku može biti potrebna za održavanje svjetionika, meteoroloških stanica, komunikacijskih sustava i drugih infrastrukturnih potreba. Budući da otok nije povezan kopnom putem električne mreže, tradicionalno rješenje koje se koristi je upotreba generatora na dizel gorivo. Međutim, s obzirom na težnje za smanjenjem emisija stakleničkih plinova i prelaskom na obnovljive izvore energije, može se razmatrati upotreba energije valova kao alternativno rješenje.

Na otoku Lastovo s obzirom na prisutnost stanovništva i naselja, godišnje potrebe za električnom energijom su veće u usporedbi s nenaseljenim otocima. Opskrba električnom energijom osigurana je podmorskim kabelom koji je povezan sa električnom mrežom na kopnu. Prema popisu stanovništva 2021. na otoku je zabilježeno 291 kućanstvo. Prosječna potrošnja jednog kućanstva godišnje iznosi približno 3500 kWh. Prema tim podacima može se izračunati da se na otoku Lastovu potroši približno 1018,5 MWh godišnje. S obzirom na malu navedenu potrošnju i podatke dobivene o proizvodnji električne energije na lokaciji postoji mogućnost osiguranja dovoljne količine za opskrbu oba navedena otoka. Uređaj Archimedes Waveswing prosječno proizvodi 330,2 kWh, dok je za otok Lastovo potrebno približno 116,26 kW/h. Iako je faktor kapaciteta AWS 5,27% na odabranoj lokaciji, uređaj može zadovoljiti potražnju.

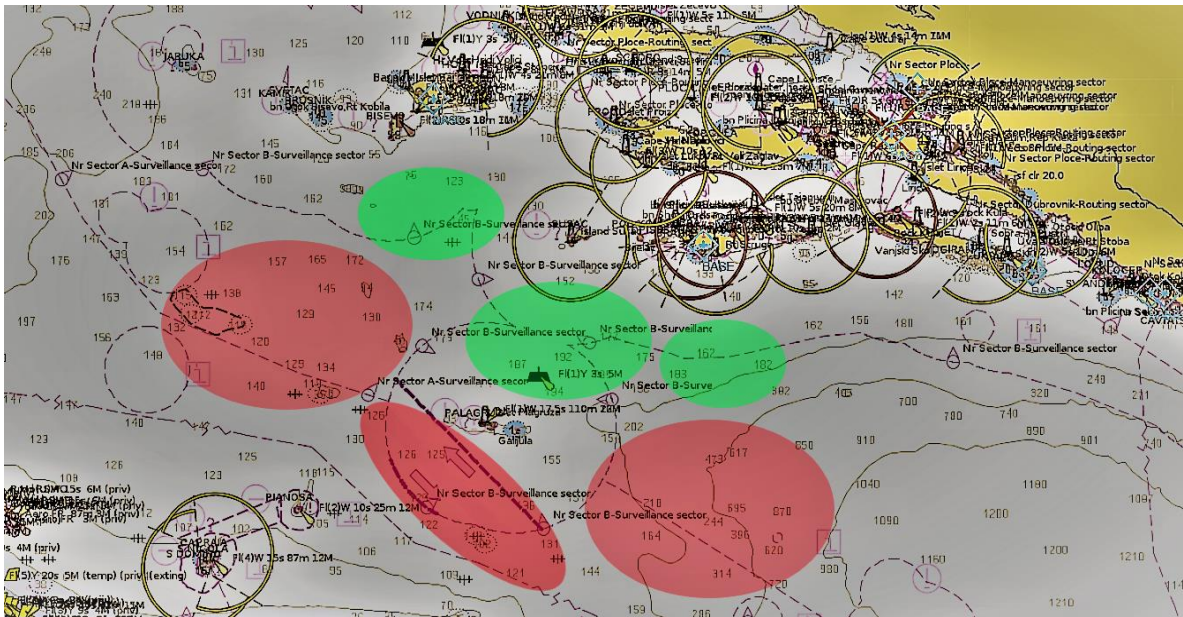
#### **4.5. UTJECAJ PLOVIDBE NA ODABIR LOKACIJE WEC UREĐAJA**

Prilikom određivanja lokacije WEC uređaja također je potrebno obratiti pozornost na obližnje morske aktivnosti i plovidbu.

Na prikazu elektroničke karte obojana područja označena su s obzirom na pravce odvijanja plovidbe, granice Ekskluzivne ekonomske zone i dubine. Crvene oznake na prikazu (sjeverno i južno od otoka Palagruže) označavaju mjesta koja zbog plovidbenih pravaca nisu pogodna za postavljanje uređaja za iskorištavanje energije valova, dok zelena boja označava pogodna područja.

Promatrajući izobate na prikazu vidljivo je da južno od otoka Palagruže dubine značajno rastu. Stoga se iz ekonomskih razloga može se zaključiti da područje nije pogodno za postavljanje uređaja za iskorištavanje energije valova radi proporcionalnog rasta dubine i troškova postavljanja i održavanja sustava.

## Slika 25: Prikaz elektroničke pomorske navigacijske karte RH – južni dio Jadrana



Izradila autorica

U lipnju 2022. godine u blizini otoka Palagruže postavljena je meteorološko-oceanografska plutača. Plutača se nalazi usirena na dubini od 190m, a posjeduje dualne meteorološke senzore, valomjere površinskih valova i strujomjere. Dobiveni mjerni podaci u jednosatnim i trosatnim porukama putem satelitske komunikacije odašilju se u Službu regionalnog centra Jadran.

## Slika 26: Plutača u blizini otoka Palagruža



Izvor: <https://www.morski.hr/kod-palagruze-postavljena-druga-od-pet-meteorolosko-oceanografskih-plutaca/>

Kombinacijom meteorološko-oceanografske plutače s uređajem za iskorištavanje energije valova moguće je postići sljedeće prednosti:

1. Istovremeno prikupljanje podataka i proizvodnja energije – meteorološko-oceanografska plutača uz svoju primarnu funkciju prikupljanja podataka također može proizvoditi energiju postavljanjem uređaja za iskorištavanje energije valova
2. Financijska učinkovitost – dijeljenjem infrastrukture (zajedničkog sustava priveza ili potporne strukture) i resursa između plutače i uređaja moguće je smanjiti troškove rada i održavanja.
3. Prostorna optimizacija – integracijom uređaja optimizira se korištenje prostora i smanjuje utjecaj na morski ekosustav, odvijanje pomorskog prometa i ostale morske aktivnosti.
4. Praćenje podataka – uređaj za iskorištavanje energije valova može poslužiti kao dodatan izvor koji putem senzora u stvarnom vremenu odašilje podatke o karakteristikama valova. Na taj način moguće je povećati cjelovitost i točnost prikupljenih podataka

Praćenjem i analizom podataka o snazi i karakteristikama valova koje prikuplja mjerna plutača, moguće je optimizirati rad uređaja za proizvodnju energije valova, odnosno prilagoditi postavke uređaja kako bi se omogućilo bolje iskorištavanje energije i generiranje veće količine energije.

Iako kombinacija meteorološko-oceanografske plutače i uređaja za iskorištavanje energije valova ima mnoge prednosti, postoje i neki potencijalni nedostaci koje treba uzeti u obzir:

1. Položaj uređaja za iskorištavanje energije valova može imati utjecaj na točnost mjerenja plutače u pojedinim kutovima. Korištenje dodatnih senzora za kompenzaciju može pomoći u ispravljanju eventualnih pogrešaka u očitanjima.
2. Mjerna plutača može biti postavljena na način da ometa protok valova u pojedinim kutovima što može rezultirati smanjenjem energije koju valovi prenose i time smanjenjem količine električne energije koju sustav može generirati.
3. Oblik i veličina mjerne plutače može utjecati na povećanje hidrodinamičkog otpora. Povećanjem otpora potrebno je više energije kako bi se plutača pomicala zajedno s valovima, što može rezultirati smanjenjem ukupne učinkovitosti pretvorbe energije.



4. Ukoliko mjerna plutača nije baždarena, odnosno nepravilno očitava podatke o valovima, može doći do pogrešnih izračuna i prilagodbe parametara uređaja za iskorištavanje energije valova.

## 5. ZAKLJUČAK

Iako iskorištavanje energije vala donosi brojne prednosti zbog predvidivosti i velikih količina energije koje je moguće prikupiti, postoje i brojni izazovi koje je potrebno prevladati. Izazovi s kojima se susreću inženjeri tijekom implementacije ovih sustava su okolišni uvjeti, visoki troškovi instalacije i održavanja, pouzdanost i učinkovitost.

Europska Unija kako bi ostala konkurentna na tržištu energije valova trebala bi postaviti jasne političke ciljeve koji bi utjecali na zainteresiranost privatnih ulagača kako bi ponovno stekla tehnološku prednost i održivost sektora. Kao zemlja članica EU, Hrvatska je također obvezna povećati udio obnovljivih izvora energije u ukupnoj potrošnji. Energetski potencijal valova u Hrvatskoj još uvijek je nedovoljno istražen, stoga postoje brojne mogućnosti za daljnja istraživanja i razvoj.

Rezultati dobiveni analizom podataka na lokaciji u blizini otoka Palagruže pokazuju da postoji potencijal za iskorištavanje energije valova, no pretvarači o kojima su dostupni podaci nisu najprikladniji za navedeno područje. Rezultati koji pokazuju niski faktor kapaciteta nastaju radi nižih vrijednosti značajnih visina i vršnog perioda pri kojima pretvarač nije u mogućnosti proizvesti energiju ili je proizvedena energija vrlo niska.

Implementacija uređaja za iskorištavanje energije valova u Republici Hrvatskoj doprinijela bi rastu elektroenergetskog sektora i smanjenju štetnih utjecaja na okoliš. Također, implementacijom bi se potaknuo rast gospodarstva te povećao stupanj neovisnosti o uvozu energije.

## LITERATURA

1. <https://www.geeksforgeeks.org/introduction-to-waves-definition-types-properties/> (18.08.2023)
2. <https://openstax.org/books/physics/pages/13-2-wave-properties-speed-amplitude-frequency-and-period> (18.08.2023)
3. <https://courses.lumenlearning.com/suny-physics/chapter/16-10-superposition-and-interference/> (18.08.2023)
4. Kavadiki Veerabhadrapa, B.G. Suhas, Chidanand K. Mangrulkar, R. Suresh Kumar, V.S. Mudakappanavar, Narahari, K.N. Seetharamu (2022) "Power Generation Using Ocean Waves: A Review" Global Transitions Proceedings, 3(2), str. 359-370.
5. Parwal, A., Fregelius, M., Temiz, I., Götteman, M., de Oliveira, J.G., Boström, C., Leijon, M. (2018) "Energy management for a grid-connected wave energy park through a hybrid energy storage system" Applied Energy, 231.
6. Penalba, M., Ringwood, J.V., "A Review of Wave-to-Wire Models for Wave Energy Converters" Energie, 2016
7. R. Ekström, M.Leijon, Control of offshore marine substation for grid-connection of a wave power farm, International Journal of Marine Energy, Vol.5,2014.
8. Li, H., Sun, X., Zhou, H. "Wave energy: history, implementations, environmental impacts, and economics" Proc. SPIE 12326, 2nd International Conference on Materials Chemistry and Environmental Engineering, CONF MCEE 2022.
9. <https://www.marineinsight.com/offshore/the-agucadoura-wave-farm-the-worlds-first-wave-farm/> (15.05.2023)
10. <https://www.weforum.org/agenda/2022/03/wave-energy-ocean-electricity-renewables/> (16.05.2023)
11. <https://www.oceanenergy-europe.eu/annual/wave-energy-scotland-wes/> (15.05.2023)
12. <https://energypost.eu/unlocking-the-potential-of-ocean-energy-from-megawatts-to-gigawatts/> (17.06.2023)
13. [https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/offshore-renewable-energy\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/offshore-renewable-energy_en)
14. <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/hr/sheet/70/energija-iz-obnovljivih-izvora> (27.05.2023)
15. Ocean Energy Europe, Ocean Energy Key trends and statistics 2022, March 2023

16. B. Holmes & K. Nielsen (2010) Report T02-2.1 Guidelines for the Development & Testing of Wave Energy Systems, OES-IA Annex II Task 2.1
17. Šljivac, D.; Temiz, I.; Nakomčić-Smaragdakis, B.; Žnidarec, M. Integracija elektrana na valovima u elektroenergetske sustave jadranskih otoka: tehničke mogućnosti i međusektorski aspekti. *Voda* 2021.
18. Drew B, Plummer AR, Sahinkaya MN. A review of wave energy converter technology. *Proc Inst Mech Eng Part A-J Power Energy* 2010.
19. Oregon State University;PMEC,NNMREC, University of Washington, Wave-Energy Devices Affect the Natural Environment:Scientists plan research to better understand effects,Sea Grant Oregon Publications, February 2022.
20. Roberts, Jesse D., et al. An environmental impact assessment framework for wave energy installations. No. SAND2017-5798C. Sandia National Lab.(SNL-NM), Albuquerque, NM (United States), 2017.
21. Salter, S.H. (1986). Progress on Edinburgh Ducks. In: Evans, D.V., de Falcão, A.F.O. (eds) *Hydrodynamics of Ocean Wave-Energy Utilization*. International Union of Theoretical and Applied Mechanics. Springer, Berlin, Heidelberg.
22. <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/20455934>(21.05.2023.)
23. Ghaneei, H., & Mahmoudi, M. "Simulation, Optimization and Economic Assessment of Pelamis Wave Energy Converter.", 2021
24. J.R. Joubert, J.L.van Niekerk, J. Reinecke I. Meyer , *Wave Energy Converters (WECs)*, Centre for Renewable and Sustainable Energy Studies, 2013.
25. <https://cpower.co/products/#stingray> (22.05.2023)
26. [https://www.marinespecies.org/introduced/wiki/Wave\\_energy\\_converters#:~:text=Poi nt%20absorber%20are%20buoy%2Dtype,or%20linear%20generator%20into%20elect ricity](https://www.marinespecies.org/introduced/wiki/Wave_energy_converters#:~:text=Poi nt%20absorber%20are%20buoy%2Dtype,or%20linear%20generator%20into%20elect ricity). (22.05.2023)
27. <https://www.oscillapower.com/technology> (27.05.2023)
28. <https://www.oscillapower.com/triton-c> (30.05.2023)
29. Drew B, Plummer AR, Sahinkaya MN. A review of wave energy converter technology. *Proc Inst Mech Eng Part A-J Power Energy* 2010.
30. <https://awsocan.com/2022/11/aws-waveswing-trials-exceed-expectations/> (05.06.2023)
31. <https://tethys.pnnl.gov/technology/wave#:~:text=Wave%20energy%20technologies% 2C%20also%20known,modular%20and%20deployed%20in%20arrays>. (25.06.2023)
32. <http://wavedragon.net/specifications/> (30.06.20203)

33. <http://www.moreenergylab.polito.it/iswec/#:~:text=ISWEC%2C%20acronym%20of%20Inertial%20Sea,via%20the%20coupling%20between%20hull's> (15.07.2023)
34. <https://www.eni.com/en-IT/operations/iswec-eni.html> (15.07.2023)
35. <https://atargis.com/> (16.07.2023)
36. <https://www.offshore-energy.biz/eco-wave-power-to-relocate-wave-energy-plant-from-gibraltar-to-l-a/> (17.05.2023)
37. <https://tethys-engineering.pnnl.gov/technology/oscillating-wave-surge-converter> (17.05.2023)
38. Folley, M., & Whittaker T., Osterried, M., The Oscillating Wave Surge Converter. Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference, 2004.
39. [https://www.renewableenergymagazine.com/ocean\\_energy/awenergya-s-waveroller-issued-a-manufacturing-certificate-20190501](https://www.renewableenergymagazine.com/ocean_energy/awenergya-s-waveroller-issued-a-manufacturing-certificate-20190501) (15.06.2023)
40. <https://aw-energy.com/waveroller/> (15.06.2023)
41. D. Clemente, P. Rosa-Santos, T. Ferradosa, F. Taveira-Pinto, Wave energy conversion energizing offshore aquaculture: Prospects along the Portuguese coastline, Renewable Energy, Volume 204, 2023, str. 347-358
42. S.C. Bhatia, 13 - Tide, wave and ocean energy, Editor(s): S.C. Bhatia, Advanced Renewable Energy Systems, Woodhead Publishing India, 2014, str 307-333.
43. Heath T.V., A review of oscillating water columns, Phil. Trans. R. Soc. 2012.
44. Muetze, A. & Vining, J.G., Ocean Wave Energy Conversion - A Survey. Conference Record, IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society) 2006.
45. <https://www.alternative-energy-tutorials.com/wave-energy/wave-energy-devices.html> (23.06.2023)
46. Portillo Juan, N.; Negro Valdecantos, V.; Esteban, M.D.; López Gutiérrez, J.S. Review of the Influence of Oceanographic and Geometric Parameters on Oscillating Water Columns. *J. Mar. Sci. Eng.* 2022, *10*, 226.
47. A. Farkas, N. Degiuli, I. Martić, „Assessment of Offshore Wave Energy Potential in the Croatian Part of the Adriatic Sea and Comparison with Wind Energy Potential”, *Energies* an open access journal from MDPI, 2019.
48. M. Deelen, J B de Jonge, An operational based method for determining the design sea states of heavy transport vessels, Marine Heavy Transport & Lift IV, 29-30 October, London, UK

49. James R Joubert, Johannes L van Niekerk, Josh Reinecke, Imke Meyer, Wave Energy Converters (WECs), Centre for Renewable and Sustainable Energy Studies, October 2013
50. Pacaldo, J.C.; Bilgera, P.H.T.; Abundo, M.L.S. Nearshore Wave Energy Resource Assessment for Off-Grid Islands: A Case Study in Cuyo Island, Palawan, Philippines. *Energies* 2022

## POPIS TABLICA

Tablica 1: Parametri vala World Wave Atlas .....	39
Tablica 2: Parametri klime valova.....	41
Tablica 3: Dijagram raspršenja valova na odabranoj lokaciji.....	42
Tablica 4: Matrica snage uređaja AWS 2470 kW dana u kW .....	43
Tablica 5: Matrica snaga uređaja AquaBuoy 250 kW dana u kW .....	44
Tablica 6: Matrica snage uređaja Wave Dragon 5900 kW dana u kW .....	45
Tablica 7: Matrica snage uređaja Wave Dragon 7000 kW dana u kW .....	45
Tablica 8: Dobivene vrijednosti snaga i faktora kapaciteta .....	46

## POPIS SHEMA

Slika 1: Datawell Waverider Mk III.....	7
Slika 2: Dijagram pretvarača energije vala.....	10
Slika 3: Obalni OWC u Norveškoj oko 1985. ....	11
Slika 4: Globalna distribucija srednje godišnje snage valova.....	13
Slika 5: WEC dizajni .....	14
Slika 6: Sigma WEC.....	16
Slika 7 : Podjela uređaja s obzirom na udaljenost od obale.....	20
Slika 8: Različiti načini pretvorbe energije s obzirom na smjer upadnog vala.....	22
Slika 9: Edinburška patka .....	24
Slika 10: Dva Pelamisova pretvarača na ispitnom mjestu Billia Croo EMEC .....	24
Slika 11: Prikaz presjeka hidrauličkog motora uređaja Pelamis.....	25
Slika 12: StingRAY uslužni sustav za napajanje valovima.....	26
Slika 13: PowerBuoy PB3 .....	27
Slika 14: Uređaj Triton-C .....	28
Slika 15: Archimedes Waveswing uređaj.....	29
Slika 16: Wave Dragon.....	30
Slika 17: ISWEC .....	31
Slika 18: ISWEC uređaj postavljen u blizini obale Talijanskog otoka Pantelleria.....	32
Slika 19: CycWEC .....	33
Slika 20: EcoWave Power fiksirani točkasti apsorber valova .....	34
Slika 21: Wave Roller.....	35
Slika 22: Tehnologija oscilirajućeg vodenog stupca .....	37
Slika 23: Prikaz najčešće korištenih turbina .....	38
Slika 24: Lokacija 42,5°N 16,5°E .....	41
Slika 25: Prikaz elektroničke pomorske navigacijske karte RH – južni dio Jadrana.....	48
Slika 26: Plutača u blizini otoka Palagruža .....	48