

Elektrane na morske struje

Rimac, Tomislav

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:555138>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-08-03**

Repository / Repozitorij:

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



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**

Sveučilišni studij

ELEKTRANE NA MORSKE STRUJE

Završni rad

Tomislav Rimac

Osijek, 2023.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. Zadatak	1
2. MORSKE STRUJE KAO IZVOR ENERGIJE	2
2.1. Nastanak i osnovna svojstva morskih struja	2
2.2. Prednosti korištenja morskih struja kao izvora energije	4
3. TEHNOLOŠKI DOSEG PRETVORBE ENERGIJE MORSKIH STRUJA	6
3.1. Turbine s horizontalnom osi vrtnje	11
3.1.1. Dodavanje kanala	13
3.1.2. Dvosmjerna horizontalna turbina	15
3.2. Komercijalni projekti horizontalnih turbina	18
3.2.1. SeaGen	18
3.2.2. MeyGen	19
3.2.3. O2 Orbital Marine Power	20
3.2.4. OpenHydro	21
3.3. Turbine s vertikalnom osi vrtnje	21
3.3.1. Darrieusova turbina	22
3.3.2. Savoniusova turbina	26
3.4. Komercijalni projekti vertikalnih turbina	30
3.4.1. Instream Energy Systems	30
3.4.2. OceanQuest	31
3.4.3. Hydrokinetic Power Generation Systems	32
4. PRORAČUN	33
4.1. Odabir turbina	34
4.2. Odabir lokacije	34
4.3. Obrada podataka	35
4.4. Iskoristivost i dostupnost pojedine turbine	38
4.5. Proračun mehaničke snage na rotoru turbine	42
4.5.1. Mehanički gubici na zupčanicima i ležajevima	43
4.6. Gubici generatora	46
4.6.1. Gubici energetskog pretvarača, ukupna električna energija	47

5. ZAKLJUČAK.....	50
SAŽETAK.....	51
ABSTRACT	51
LITERATURA	52
ŽIVOTOPIS.....	55

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK****Obrazac Z1P - Obrazac za ocjenu završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju**

Osijek, 30.08.2023.

Odboru za završne i diplomske ispite

Prijedlog ocjene završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju

Ime i prezime Pristupnika:	Tomislav Rimac
Studij, smjer:	Sveučilišni prijediplomski studij Elektrotehnika i informacijska
Mat. br. Pristupnika, godina upisa:	4876, 29.07.2020.
OIB Pristupnika:	08276100032
Mentor:	prof. dr. sc. Damir Šljivac
Sumentor:	,
Sumentor iz tvrtke:	
Naslov završnog rada:	Elektrane na morske struje
Znanstvena grana rada:	Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)
Zadatak završnog rad:	Opisati tehnologije elektrana na morske struje (plimu i oseku) i u praktičnom dijelu usporediti njihove energetske i ekonomske karakteristike.
Prijedlog ocjene završnog rada:	Izvrstan (5)
Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 3 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 3 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 3 bod/boda Razina samostalnosti: 3 razina
Datum prijedloga ocjene od strane mentora:	30.08.2023.
Datum potvrde ocjene od strane Odbora:	08.09.2023.
Potvrda mentora o predaji konačne verzije rada:	Mentor elektronički potpisao predaju konačne verzije.
	Datum:

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA**

Osijek, 09.09.2023.

Ime i prezime studenta:

Tomislav Rimac

Studij:

Sveučilišni prijediplomski studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija

Mat. br. studenta, godina upisa:

4876, 29.07.2020.

Turnitin podudaranje [%]:

1

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Elektrane na morske struje**

izrađen pod vodstvom mentora prof. dr. sc. Damir Šljivac

i sumentora ,

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.

Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

1. UVOD

S napretkom znanosti, tehnologije te proširenjem industrijalizacije u svijetu se sve češće nameće problem nedostatka proizvedene električne energije, te je potrebno tražiti nove izvore i nove načine proizvodnje električne energije. Naglasak je posebice na proizvodnji električne energije iz obnovljivih izvora energije, koji uz proizvedenu električnu energiju doprinose ekološkoj prihvatljivosti zbog manjeg emitiranja stakleničkih plinova u atmosferu te manjeg zagađenja zraka u usporedbi s konvencionalnim izvorima električne energije.

Jedan od obnovljivih izvora energije koji to omogućava jest energija oceana, gdje se kinetička i potencijalna energija vodenih masa u morima i oceanima pomoću nekakve naprave, najčešće turbine, pretvara u mehaničku energiju, te zatim pomoću generatora u električnu energiju. Gibanje vodenih masa može biti uzrokovano, uz plimu i oseku te morske valove, posredstvom morskih struja. Proizvodnja električne energije posredstvom morskih struja je jedna od novijih grana obnovljivih izvora energije te se tehnologije koje omogućavaju ovakvu energetska pretvorbu trenutno nalaze u razvojnoj fazi, stoga je kroz daljnja istraživanja i testiranja potrebno usavršiti elektrane na morske struje kako bi se omogućila šira komercijalna upotreba.

Ovaj završni rad je podjeljen u četiri poglavlja. Prvo poglavlje predstavlja uvod. Drugo poglavlje daje definiciju morskih struja, opisuje njihov nastanak te daje uvid u pojedine lokacije koje bi bile pogodne za pretvaranje energije gibanja morskih struja u električnu energiju na osnovu njihovih parametara i ukupnog energetskeg potencijala. Treće poglavlje objašnjava tehnologije pretvorbe energije gibanja morskih struja u električnu energiju, istražuje njihov tehnološki doseg te navodi ključne podatke koji omogućavaju opstojnost pojedine tehnologije u svhu njenog daljnjeg razvoja i nastavka proizvodnje električne energije u budućnosti. Četvrto poglavlje daje praktični primjer proračuna instalirane vrste tehnologije za proizvodnju električne energije iz morskih struja na nekoj mikrolokaciji na osnovu kojeg je moguće zaključiti je li određena tehnologija isplativa za danu mikrolokaciju na osnovu količine proizvedene električne energije u nekom vremenskom intervalu.

1.1. Zadatak

Opisati tehnologije elektrana na morske struje (plimu i oseku) i u praktičnom dijelu usporediti njihove energetske i ekonomske karakteristike.

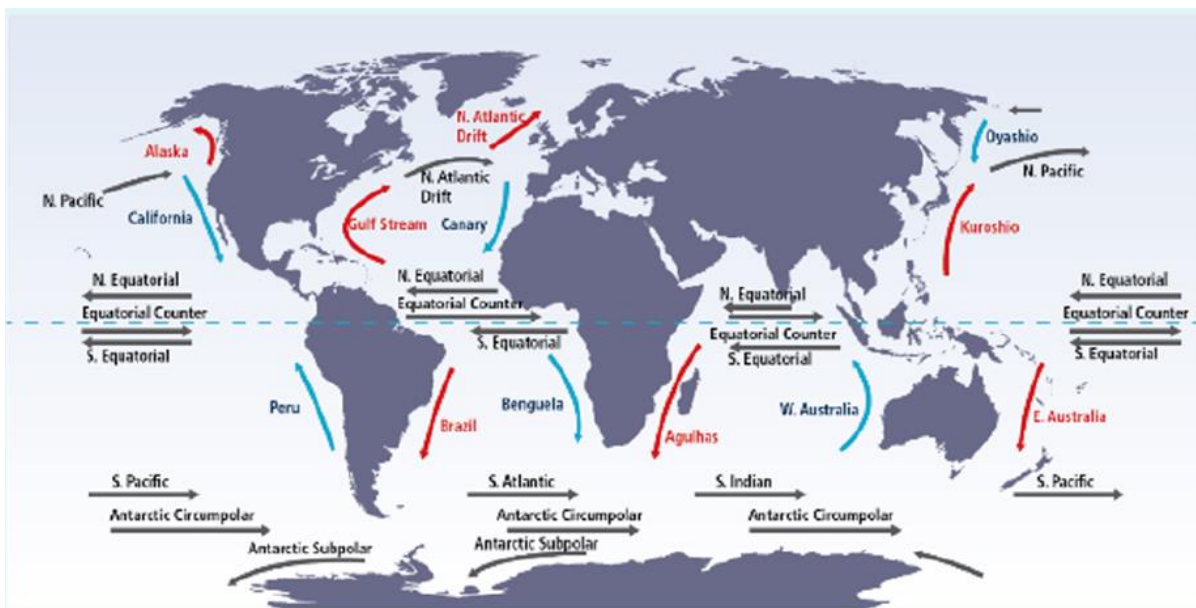
2. MORSKE STRUJE KAO IZVOR ENERGIJE

2.1. Nastanak i osnovna svojstva morskih struja

Morske struje su gibanja vode u oceanima i morima, a mogu biti uzrokovane plimom i osekom ili gibanjem uzrokovanim temperaturnim gradijentom. [1] Na njihovo nastajanje i strujanje utječu brzina i smjer vjeta, zagrijavanje vodenih masa posredstvom energije Sunca, gravitacijska sila te Coriolisova sila.

Zagrijavanje vodenih masa posredstvom energije Sunca uzrokuje prostorno širenje vode. Zbog toga je blizu ekvatora, gdje je voda toplija zbog većeg iznosa Sunčeve energije, razina vode 8 centimetara viša nego na ostalim dijelovima zemljopisne širine. Tu razliku u visini uzrokuje temperaturni gradijent, te se voda kreće niz nagib. Puhanje vjeta na površini oceana pokreće vodene mase. Trenje između vjeta i vode utječe na smjer kretanja vodenih masa. Gravitacija povlači dio vode na dno zbog gustoće koja ovisi o salinitetu vode te tako uzrokuje vertikalno kretanje vodenih masa. Coriolisova sila uzrokuje kretanje morskih struja u smjeru kazaljke na satu u sjevernom dijelu Zemljine polutke te kretanje morskih struja suprotno od smjera kazaljke na satu u južnoj dijelu Zemljine polutke. [2]

Pošto su lokacije i brzina morskih struja koje nastaju zbog temperaturnog gradijenta već desetljećima poznate, na osnovu njihove razdiobe u svjetskim oceanima i brzine određenih morskih struja možemo ustanoviti nekoliko interesnih područja za izgradnju elektrana.

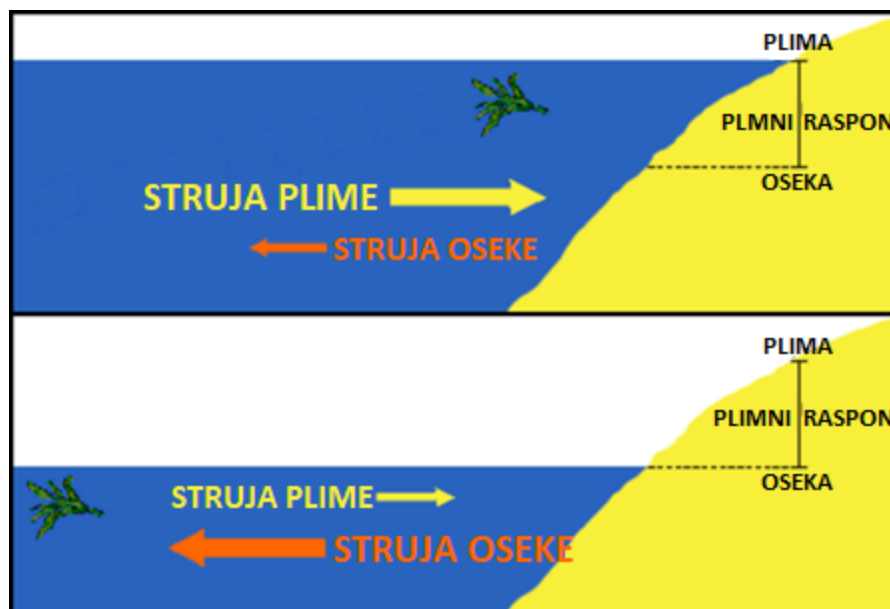


Slika 2.1. Svjetska razdioba glavnih morskih struja [3]

Među najbrže morske struje uzrokovane temperaturnim gradijentom spadaju Golska struja, Kuroshio te Istočna australijska struja, čije su prosječne brzine strujanja dovoljno visoke kako bi se njihova energija upotrijebila za proizvodnju električne energije. Minimalna brzina strujanja mora iznositi 1 m/s kako bi se ovakva vrsta morske struje mogla upotrijebiti za proizvodnju električne energije. [4] Ovakva vrsta morskih struja uvijek struji istom putanjom, sa vrlo malo fluktuacija u brzini na odabranoj mikrolokaciji te ju takvi parametri čine pogodnom za izgradnju temeljnih elektrana na morske struje.

Kada gledamo globalni potencijal svih morskih struja, početne procjene iznose vrijednost energetskog potencijala od 450 000 MW. [5]

Morske struje se također mogu pojaviti zbog naizmjenične pojave plime i oseke, te se tada nazivaju plimnim strujama. Kako se razina mora podiže za vrijeme trajanja plime, u obalnim područjima ispod morske razine nastaje struja plime (engl. *Flood current*), čija brzina strujanja poprima najveći iznos kada je vodostaj najviši. Nakon što je vodostaj poprimio maksimalni iznos, počinje djelovati oseka, to jest snižavanje razine mora. Struja plime tada postaje struja oseke (engl. *Ebb current*), mijenja smjer, a maksimalnu brzinu postiže kada je vodostaj najniži. Nakon toga se proces nastavlja u obliku kružnog ponavljanja. Ovisnost brzine strujanja ovakve plimne struje o vremenu je sinusoidalna, kao i visina vodostaja kod plime i oseke. Razlog tome je što su plimne struje posljedica plime i oseke, koje nastaju djelovanjem gravitacijskih sila Sunca i Mjeseca na Zemlju.



Slika 2.2. Smjer i relativna brzina plimne struje pri najvišem vodostaju (gore) i najnižem vodostaju (dolje) [6]

Prosječno trajanje jedne struje plime i struje oseke iznosi pola mjesečevog dana, to jest u jednom mjesečevom danu se dva puta pojavi struja plime i struja oseke. Mjesečev dan se definira kao vrijeme jednog okretaja Zemlje oko svoje osi u odnosu na položaj Mjeseca ili kao vremenski interval između dva prolaska Mjeseca iznad meridijana nekog mjesta, te njegovo trajanje iznosi otprilike 24,84 solarna sata. [7] Ovakva vrsta morskih struja, za razliku od morskih struja uzrokovanih temperaturnim gradijentom, mijenja smjer strujanja te je potrebno implementirati tehnologije za vrstu energetske pretvorbe koja može pohraniti energiju iz oba smjera strujanja. Također ima promjenjivu brzinu strujanja pa je kinetičku energiju plimnih struja pogodnije koristiti za konstruiranje vršnih elektrana na morske struje.

2.2. Prednosti korištenja morskih struja kao izvora energije

Postoje mnoge prednosti pri korištenju energije morskih struja kao obnovljivog izvora energije te više razloga zašto je povoljnije graditi elektrane na morske struje naspram elektrana koje koriste druge obnovljive izvore energije. Njihovo strujanje je konstantno, te količina energije koju iz morskih struja možemo dobiti u nekom vremenskom intervalu se može bolje procijeniti naspram dobivene energije pomoću vjetrova, Sunca ili pomoću morskih valova u istom intervalu zbog veće predvidljivosti.

Dva parametra koja najviše utječu na predvidljivost morskih struja su odstupanja od čiste sinusoidalne ovisnosti amplitude o vremenu kod plimnih struja te šum uzrokovan turbulencijom koja nastaje zbog površinskih vjetrova. Iako zbog toga morske struje i plimne struje nisu potpuno predvidljive, razina nesigurnosti ne bi trebala predstavljati prepreku u podizanju stupnja komercijalizacije. U usporedbi s vjetroelektranama koje pohranjuju energiju iz stohastičkog resursa, a svejedno su financirane, spojene na mrežu te proizvode električnu energiju po usporedivoj cijeni, proizvodnja električne energije pomoću morskih i plimnih struja posjeduje puno viši stupanj predvidljivosti. [8]

U usporedbi s solarnim elektranama, morske struje su prisutne u blizini svih kontinenata, što znači da je elektrane na morske struje pogodno graditi i u hladnijim predjelima gdje obnovljiva energija Sunca ima manji potencijal.

Jedna od prednosti bi također bio vizualni efekt naspram vjetroelektrana te izostanak zauzimanja obradive zemljane površine u usporedbi sa solarnim elektranama.

Dokazano je da vjetroelektrane smanjuju cijenu nekretnina u područjima gdje su vjetroturbine vidljive, te da također smanjuju cijenu nekretnina u područjima koja graniče s područjem gdje su

vjetroturbine vidljive. Uzimajući u obzir srednju vrijednost visine vjetroturbina, smanjene cijene iznosi od 5 do 6 % unutar 2 kilometra od vjetroturbina, malo manje od 2 % na razmaku od 2 do 4 kilometra te manje od 1 % na razmaku od 14 kilometara koji predstavlja granicu vidljivosti vjetroturbine srednje visine. [9] U usporedbi, elektrane na morske struje imaju minimalan vizualni efekt jer se velika većina elektrana gradi dalje od obale te ispod razine mora.

Kod solarnih elektrana montiranih na zemlju, sustavi srednjih i velikih snaga, ako se nalaze na površini koja je neposredno prije postavljanja elektrane bila smatrana obradivom, predstavljaju problem zauzimanja i smanjenja površine potencijalno obradivog zemljišta. Izlazna snaga električne energije tada predstavlja konkurenciju proizvodnji hrane. [10] Prednost elektrana na morske struje, te općenito svih elektrana koje koriste energiju oceana jest da svoju izlaznu snagu te količinu proizvedene električne energije ne moraju opravdavati zbog zauzimanja plodnog tla.

U uspoređi s vjetroelektranama, potrebno je usporediti iskoristivost dvaju medija kako bi se istaknula prednost morskih struja. Idealna gustoća zraka pri atmosferskom tlaku i temperaturi od 20 stupnjeva Celzijusa iznosi 1,204 kg/m³ [11], a gustoća vode 998,21 kg/m³ [12], što znači da je voda otprilike 829 puta gušća od zraka, te se strujanje gušćeg medija može iskoristiti za efikasniju proizvodnju električne energije, gdje gustoća igra ključnu ulogu u dimenzioniranju turbina kroz koje medij struji. Izlazna snaga turbine za morske struje se računa po istoj formuli kao za vjetroturbine, koja glasi:[1]

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p \quad (2-1)$$

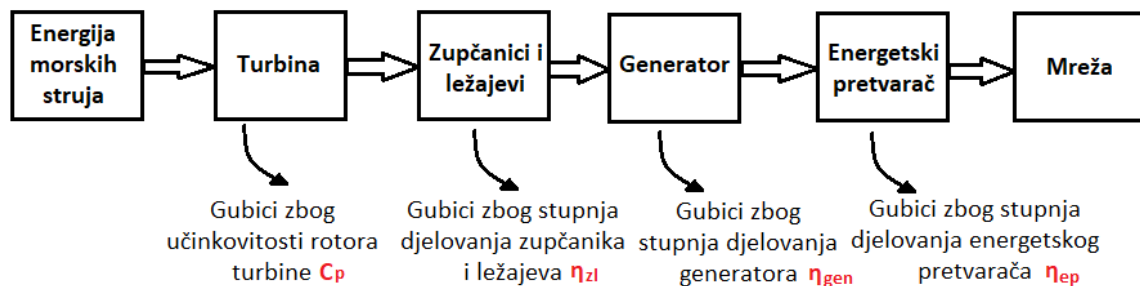
Gdje je P izlazna mehanička snaga turbine, ρ gustoća medija, A površina rotora, v brzina strujanja fluida, C_p koeficijent iskoristivosti fluida, koji predstavlja stupanj djelovanja rotora turbine. Površina rotora turbine se može opisati na sljedeće načine:

$$A = \begin{cases} r^2 \pi = \frac{d^2 \pi}{4}; & \text{za horizontalnu turbinu} \\ rh; & \text{za vertikalnu turbinu} \end{cases} \quad (2-2)$$

Gdje r predstavlja polumjer rotora, d promjer rotora, te h visinu rotora. Obje vrste turbina vrtnjom svojih oštrica zatvaraju volumen u obliku valjka, ali se horizontalna turbina postavlja tako da je baza oblika (kružnica) okomita na smjer morskih struja, dok je kod vertikalnih turbina okomito oplošje (pravokutnik). Pošto je gustoća medija znatno veća, površina se može smanjiti tako što se smanji polumjer rotora, što znači da turbina dizajnirana za morske struje može pretvoriti istu količinu energije kao vjetroturbina ali na vrlo manjoj površini, što znači da turbine za morske struje imaju veću energetska gustoću naspram vjetroturbina.

3. TEHNOLOŠKI DOSEG PRETVORBE ENERGIJE MORSKIH STRUJA

Postoje dva glavna načina pomoću kojih se može pohraniti energija vode, hidrostatički i hidrodinamički način. Dok hidrostatički način proizvodi električnu energiju pomoću skladištenja vode u rezervoarima gdje se iskorištava razlika tlakova kako bi se potencijalna energija vode pomoću odgovarajućih uređaja pretvorila u mehaničku energiju, a zatim pomoću generatora u električnu energiju, u hidrokinetičkom pristupu se za proizvodnju električne energije koristi kinetička energija, u koju spada i energija morskih struja. [13] Proces pretvorbe započinje pretvorbom kinetičke energije morskih struja u mehaničku energiju pomoću turbine. Morske struje svojim strujanjem okreću oštrice rotora turbine u određenom smjeru, time kreirajući određeni moment i brzinu vrtnje zbog kojih nastaje mehanička energija. Ta mehanička energija se sa rotora turbine prenosi na zupčanike i ležajeve. Preko zupčanika i ležajeva mehanička energija se dalje prenosi do generatora, te se tijekom vremena rada generatora mehanička energija pretvara u električnu. Turbina i generator zajedno čine turbogenerator. Pošto je iznos proizvedene električne energije na generatoru u nekom trenutku varijabilan, jer ovisi o brzini morskih struja, električna energija se pomoću energetske pretvarača prilagođava potrebama mreže. Nakon toga se proizvedena električna energija distribuira do krajnjeg korisnika pomoću elektroenergetske mreže u svrhu potrošnje.



Slika 3.1. Lanac energetske pretvorbe hidrokinetičkih sustava

Zbog nesavršenosti procesa pretvorbe, u svakom dijelu lanca pretvorbe se događaju određeni gubici energije. Izraz (2-1) moramo proširiti kako bi u obzir uzeli sveukupne gubitke koji se događaju pri pretvorbi energije morskih struja u električnu energiju, te dobivamo sljedeći izraz.

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \eta \quad (3-1)$$

Gdje η predstavlja bezdimenzionalni stupanj djelovanja pretvorbe energije morskih struja u električnu energiju. Uzevši u obzir činjenicu da se pri procesu pretvorbe gubici manifestiraju na različite načine, koeficijent možemo proširiti sljedećim izrazom.

$$\eta = C_p \eta_{zl} \eta_{gen} \eta_{ep} \quad (3-2)$$

Gdje η_{zl} predstavlja stupanj djelovanja zupčanika i ležajeva, η_{gen} stupanj djelovanja generatora koji pretvara mehaničku energiju u električnu, te η_{ep} koji predstavlja stupanj djelovanja energetskog pretvarača. Sve navedene veličine su bezdimenzionalne jer predstavljaju omjer uložene i dobivene snage. Dok mehanički i električni stupanj djelovanja ovise o vrsti izvedbe generatora, energetskog pretvarača i pogonskog mehanizma, koeficijent iskoristivosti ovisi o vrsti izvedbe samih turbina, to jest načinu na koji započinje energetska pretvorba pohranjivanjem energije morskih struja posredstvom turbine.

Postoje različite vrste izvedbi turbina, koje se između ostaloga mogu razlikovati po konstrukciji, stupnju djelovanja rotora turbine te stupnju razvijenosti tehnologije, koji nam zapravo govori koliko je pojedina vrsta turbine daleko od šire komercijalne upotrebe. Turbine se također mogu razlikovati po vrsti kinetičkog gibanja vode koje zajedno u kombinaciji sa pogonskim mehanizmom i generatorom pretvaraju u električnu energiju, gdje se podvrste koje se bave energetskom pretvorbom morskih struja nazivaju sustavi za pretvorbu energije morskih struja (eng. *CEC systems*). Najčešće korištene vrste turbina su:

1. Turbina s horizontalnom osi vrtnje
2. Turbina s vertikalnom osi vrtnje
3. Spiralna turbina (eng. *Helical turbine*)
4. Kanalna turbina (eng. *Ducted turbine*)

Bitno je naglasiti da spiralne i kanalne turbine predstavljaju podvrstu horizontalnih i vertikalnih turbina, gdje su rotor turbine i njegova okolina fizički izmjenjeni u svrhu povećanja koeficijenta iskoristivosti turbine. Prije ulaska u daljnju klasifikaciju, opisa principa rada i komercijalnih primjera upotrebe turbina, potrebno je opisati nekoliko parametara koji su svim vrstama turbina zajednički, jer oni ujedno i predstavljaju glavne pokazatelje efikasnosti turbina.

Maksimalna efikasnost koeficijenta iskoristivosti se naziva Betzov koeficijent, koji iznosi 0,593 za fluide koji struje slobodnim protokom. Betzov koeficijent se većinom povezuje za vjetroturbine, to jest za tehnologije koje koriste zrak kao medij za proizvodnju električne energije, ali on također vrijedi za sve Newtonove fluide. Newtonovi fluidi se mogu objasniti kao fluidi čija viskoznost ostaje konstantna neovisno o količini sile smicanja primjenjene na fluid pri konstantnoj temperaturi. Takvi fluidi imaju linearan odnos između viskoznosti i količine sile smicanja. [14] Primjeri Newtonovih fluida su zrak, ulje, alkohol, te također voda.

Betz je do konačne vrijednosti koeficijenta došao tako što je pretpostavio da srednja vrijednost brzine strujanja fluida kroz površinu rotora turbine v_{sr} zapravo predstavlja srednju vrijednost u kojoj su sumirane nesmetana brzina strujanja fluida neposredno prije turbine v_1 te brzina strujanja fluida neposredno poslije rotora v_2 : [15]

$$v_{sr} = \frac{1}{2}(v_1 + v_2) \quad (3-3)$$

Također je bitno u obzir uzeti formulu za maseni protok fluida koja glasi:

$$\frac{dm}{dt} = \rho A v_{sr} \quad (3-4)$$

Gdje derivacija mase predstavlja maseni protok, ρ gustoću fluida, A površinu rotora preko koje se odvija protok fluida te v_{SR} srednju vrijednost brzine strujanja fluida. Uvrstimo li relacije (3-1) i (3-3) u relaciju (3-4), dobivamo sljedeću relaciju:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{1}{2} \rho A (v_1 + v_2) \quad (3-5)$$

Dobivena snaga se može zapisati kao derivacija kinetičke energije morskih struja, koja glasi:

$$P = \frac{dE_k}{dt} = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} (v_1^2 - v_2^2) \quad (3-6)$$

Gdje P označava snagu koja se može dobiti iz fluida preko rotora, koja zapravo predstavlja derivaciju kinetičke energije E_k po vremenu, što znači da se iz mase dobiva maseni protok. Bitno je naglasiti da se u izrazu za kinetičku energiju ne koristi srednja brzina strujanja fluida već razlika između brzina strujanja fluida neposredno prije i poslije doticaja s rotorom. Ako uvrstimo izraz (3-5) u izraz (3-6), dobivamo konačnu formulu za snagu koja se može dobiti iz fluida:

$$P = \frac{1}{4} \rho A (v_1^2 - v_2^2) (v_1 + v_2) \quad (3-7)$$

Kako bi se odredio maksimalan koeficijent efikasnosti teoretske turbine, potrebno je snagu koja se iz fluida može dobiti preko turbine staviti u omjer sa maksimalnom teoretskom snagom turbine, čiji izraz glasi:

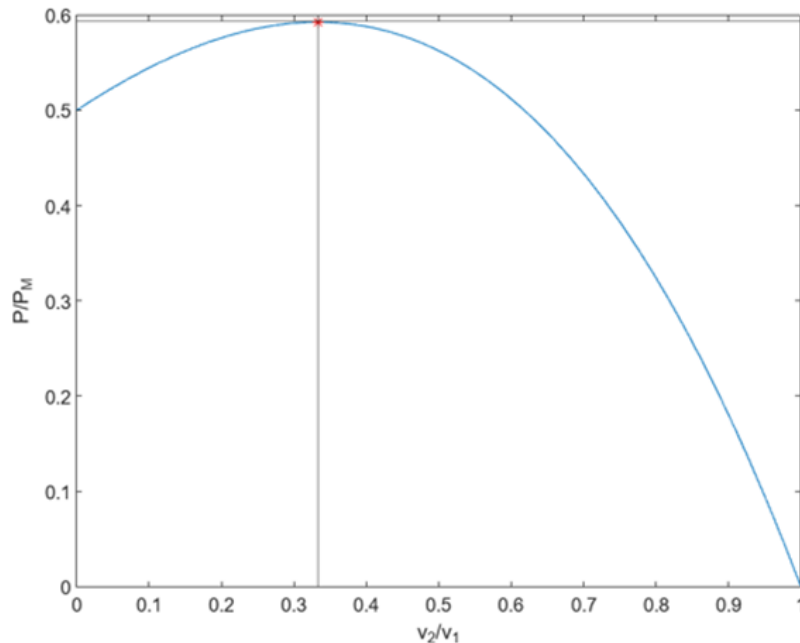
$$P_{max} = \frac{1}{2} \rho A v_1^3 \quad (3-8)$$

Bitno je naglasiti je maksimalna teoretska snaga pojednostavljenje izraza (2-1) jer postoji samo nesmetana brzina strujanja fluida neposredno prije turbine v_1 jer se zanemaruje pad brzine

prolaskom fluida kroz rotor. Stavljanjem u omjer izraza (3-7) i (3-8) dobivamo izraz koji nam pokazuje ovisnost omjera snage, tj. efikasnosti o omjeru brzina:

$$\frac{P}{P_{max}} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{v_2}{v_1} - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^3 \right) \quad (3-9)$$

Maksimum ove funkcije možemo dobiti analitički tako da funkciju deriviramo s obzirom na omjer brzina te izjednačimo s nulom i riješimo jednadžbu polinoma drugog stupnja, ili grafički odrediti pomoću MATLAB-a. Obje metode daju isto rješenje, koje nam govori da maksimalni koeficijent iskoristivosti teoretske turbine $C_{P_{max}}$ iznosi 0,593, ili točnije $16/27$ kada je omjer brzina $\frac{v_2}{v_1} = 1/3$.



Slika 3.2. Funkcija ovisnosti koeficijenta iskoristivosti o omjeru brzina sa naznačenim maksimumom

Iz slike 3.2. je moguće zaključiti da vrijednost Betzovog koeficijenta nije konstantna, već promjenjiva, te ovisi o omjeru brzina. Koeficijent iskoristivosti ovisi o koeficijentu brzohodnosti (eng. *Tip speed ratio, TSR*), koji se definira kao omjer tangencijalne brzine rotora i brzine strujanja fluida: [16]

$$\lambda = TSR = \frac{\omega r}{v} \quad (3-10)$$

Gdje ω predstavlja kutnu brzinu kojom se okreće vrh oštrice turbine. Koeficijent brzohodnosti je bezdimenzijska jedinica jer umnoškom kutne brzine rotora i njegovog radijusa dobivamo tangencijalnu brzinu, koja je linearna, te ju stavljamo u omjer s linearnom brzinom strujanja fluida. Grafički prikaz ovisnosti koeficijenta iskoristivosti o koeficijentu brzohodnosti je ključan kod svih vrsta turbina. On nam govori pri kojem koeficijentu brzohodnosti turbina može proizvesti najveću količinu električne energije. Optimalni koeficijent brzohodnosti je drugačiji za svaku turbinu, te njegov iznos ovisi o samom dizanju turbine i karakteristikama morske struje.

Koeficijent potiska (eng. *Thrust coefficient*) opisuje potisak koji rotor trpi pri promjeni tlaka fluida, te se definira kao: [15]

$$C_T = \frac{F_T}{\frac{1}{2} \rho A v^2} \quad (3-11)$$

Gdje je F_T sila potiska.

Koeficijent momenta (eng. *Torque coefficient*) opisuje moment koji se stvara na rotoru turbine pri njenom kružnom gibanju. Može se izvesti iz izraza (2-1) tako što ćemo mehaničku snagu zapisati kao umnožak momenta i kutne brzine:

$$M\omega = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_P \quad (3-22)$$

Gdje je M moment koji se stvara na rotoru. Moramo također uzeti u obzir relaciju koja povezuje linearnu i kutnu brzinu.

$$v = r\omega \quad (3-13)$$

Također u obzir moramo uzeti relaciju koja povezuje koeficijent iskoristivosti i koeficijent momenta: [17]

$$C_M = \frac{C_P}{\lambda} \quad (3-34)$$

Ako relaciju (3-12) podijelimo sa koeficijentom brzohodnosti, umjesto koeficijenta iskoristivosti dobit ćemo koeficijent momenta. Ako relaciju preuredimo tako da sa lijeve strane imamo samo koeficijent momenta, a desnu stranu jednadžbe uredimo pomoću izraza (3-13), dobivamo sljedeću relaciju:

$$C_M = \frac{M}{\frac{1}{2}\rho A v^2 r} \quad (3-15)$$

Gdje je C_M koeficijent momenta. Koeficijent momenta je bezdimenzionalan jer se definira kao omjer koeficijenta iskoristivosti i koeficijenta brzohodnosti, kao što je naglašeno u relaciji (3-14).

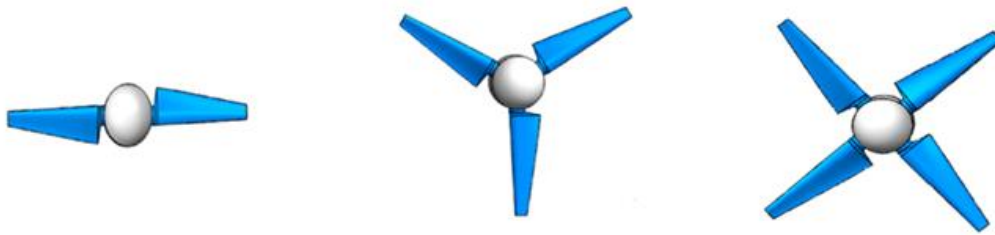
3.1. Turbine s horizontalnom osi vrtnje

Turbine s horizontalnom osi vrtnje predstavljaju najčešće korištenu vrstu dizajna turbine te su odgovorne za 76% udjela u istraživanju i razvoju uređaja za pretvorbu energije morskih struja. [18] Sastoje se od dvije ili više oštrica spojenih na rotor čiju rotaciju uzrokuje strujanje morskih struja. Površina koje oštrice stvaraju svojom rotacijom je paralelna sa površinom strujanja morskih struja.



Slika 3.3. Turbina s horizontalnom osi vrtnje, izvedba s tri oštrice [19]

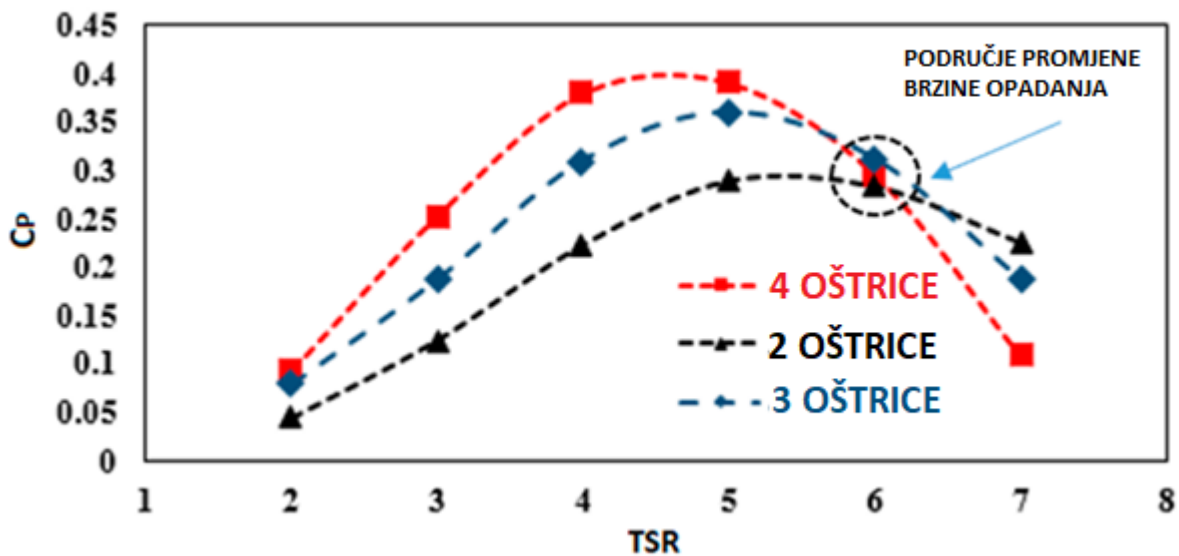
Iako horizontalne turbine, kao i svi ostali tipovi turbina, svoju isplativost mogu opravdati na različite načine, pomoću smanjenja utjecaja na okoliš, smanjenjem učestalosti održavanja ili raznolikošću primjene, najbitniji dio pri istraživanju tehnologije je razvoj najjednostavnijeg mogućeg dizajna koji će ujedno imati najefikasniji stupanj pretvorbe energije u nekom vremenskom periodu, što se kod horizontalnih turbina pokušava postići na nekoliko različitih načina. Jedan od načina je varijacija u broju korištenih oštrica.



Slika 3.4. 3D modeli horizontalne turbine sa dvije, tri i četiri oštrice. [20]

Pošto se pri izradi modela turbine za komercijalnu upotrebu koristi isti broj oštrica, uspoređivanje efikasnosti turbine u ovisnosti o broju oštrica se ispituje na testnom modelu umanjenih dimenzija prije nego što se započne proizvodnja modela za komercijalnu upotrebu. Uspoređivanje različitih komercijalnih modela turbina horizontalne izvedbe ali sa drugačijim brojem oštrica vrlo lako može dovesti do netočnih zaključaka jer su različite turbine postavljene na različite lokacije u oceanima, što znači da električnu energiju proizvode posredstvom morskih struja različitih brzina te također mogu imati različite dimenzije.

Slika 3.4. prikazuje krivulju ovisnosti koeficijenta iskoristivosti o koeficijentu brzohodnosti za tri različite horizontalne turbine, nazivne snage 36 W, promjera rotora 500 mm uronjenih u vodu pri čemu je brzina strujanja morske struje 1 m/s. [20]



Slika 3.5. Krivulja ovisnosti koeficijenta iskoristivosti o koeficijentu brzohodnosti za tri različite horizontalne turbine. [20]

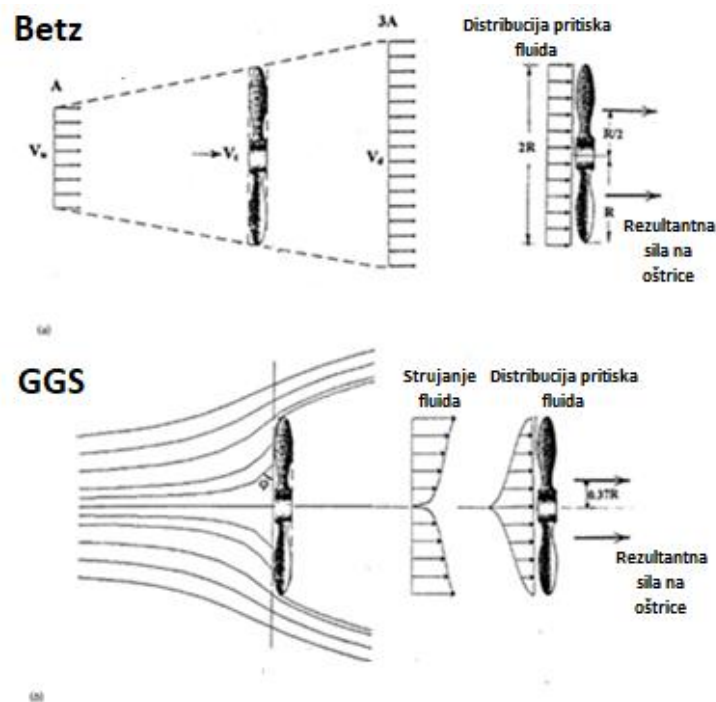
Vidljivo je da kod sva tri modela turbine veza između koeficijenta iskoristivosti i koeficijenta brzohodnosti proporcionalna dok je koeficijent brzohodnosti manji od 4,5, te da sve tri turbine postižu maksimalan koeficijent iskoristivosti kada se koeficijent brzohodnosti nalazi u području

između 4,5 i 5. Nakon toga daljnim povećanjem koeficijenta brzohodnosti, iskoristivost opada. Razlog tome je pojava većih iznosa turbulencije zbog pojave većih iznosa kinetičke energije. Također je vidljivo da sa povećanjem koeficijenta brzohodnosti iznad optimalne vrijednosti iskoristivost opada strmije što je veći broj oštrica na turbini.

3.1.1. Dodavanje kanala

Još jedan od načina povećanja učinkovitosti horizontalne turbine jest dodavanje kanala. Najveću prednost korištenja kanalne turbine trenutno predstavlja činjenica da kanalne turbine, u teoriji, mogu postići veći koeficijent iskoristivosti od Betzovog koeficijenta. Povećanje koeficijenta iskoristivosti se postiže promjenom modela toka fluida preko površine rotora turbine. Dva osnovna modela su Betzov model i GGS model.

Betzov model predstavlja jednodimenzionalni model turbine koja je uronjena u nestlačivi fluid koji pravocrtno struji konstantnom brzinom u bilo kojem dijelu struje. Također se pretpostavlja da se turbina nalazi pod ravnomjerno raspodjeljenim pritiskom. Učinkovitost turbine je definirana kao omjer snage turbine i snage jednolikog strujanja fluida kroz površinu turbine. Glavna pretpostavka modela jest da protok fluida ostaje pravocrtan pri prolasku kroz turbinu te da tlak ostaje ravnomjerno raspoređen. U stvarnosti, protok fluida poprima nepravilni oblik prilikom doticaja fluida s turbinom, te poprima krivoljastu putanju što smanjuje pritisak na turbinu. [21] Takva vrsta protoka se modelira pomoću GGS modela.



Slika 3.6. Razlika u protoku pri Betzovom modelu (gore) i GGS modelu (dolje) [21]

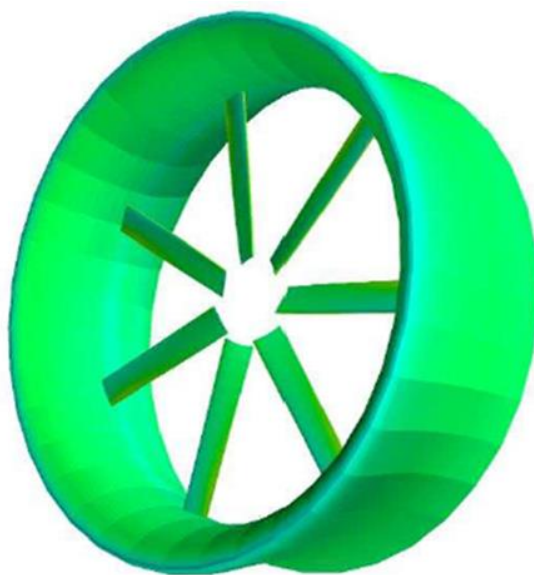
Koeficijent iskoristivosti se tada može proširiti sljedećim izrazom [22]:

$$C_{p_{MAX}} = \frac{16}{27} \frac{1}{(1-B)^2} \quad (3-16)$$

Gdje B predstavlja omjer blokade (eng. *Blockage ratio*) koji se definira kao omjer površine presjeka turbine i površine presjeka kanala morske struje unutar kojeg se turbina nalazi. Omjer blokade mora težiti prema vrijednosti 1 kako bi koeficijent iskoristivosti bio što veći, to jest omjer površine rotora i kanala moraju biti što sličniji. Rotor se mora zatvoriti u nekakav objekt po mogućnosti kružnog oblika zbog sličnosti obliku presjeka rotora kako bi se povećala iskoristivost turbine.

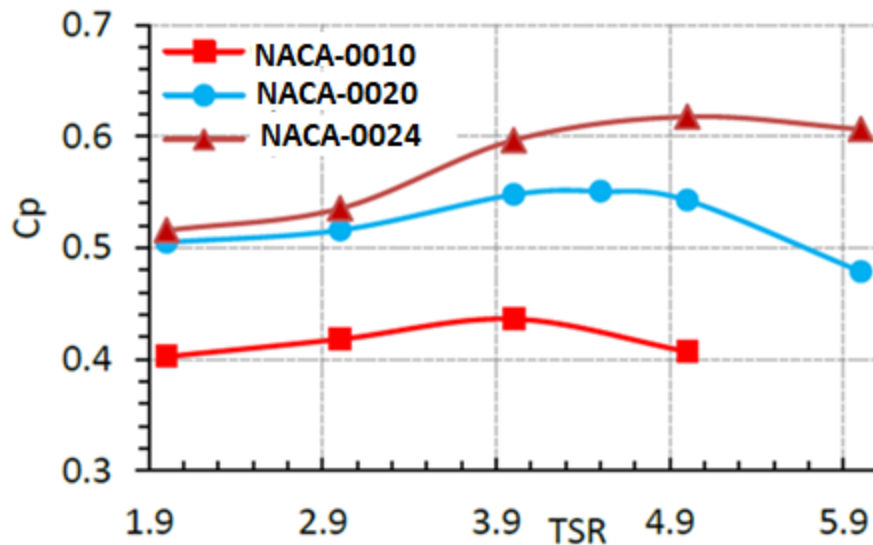
Kod dizajna kanala za horizontalnu turbinu potrebno je uvažiti nekoliko pretpostavki te razmotriti nekoliko parametara. Kako bi se mogla dokazati isplativost modela kanalne turbine, potrebno ju je usporediti za turbinom bez kanala istog dizajna oštrica te iste površine rotora, kako bi se moglo ustanoviti koji dizajn može generirati veću količinu električne energije preko iste površine. Kod samog kanala, bitna je savijenost kanala jer se pomoću savijanja kanala nadomješta smanjenje površine rotora ubrzanjem protoka fluida kroz turbinu. Drugi parametar je duljina kanala, koja je zbog savijenosti predstavljena duljinom tetive. Duljina tetive mora biti dovoljno velika kako bi turbinu uopće mogli smatrati kanalnom, ali također ne smije biti prevelika kako ne bi došlo do usporavanja toka fluida kroz turbinu.

Na slici 3.6. prikazan je 3D model kanala. Kanal je promjera 16,3 metara sa 7 oštrica na rotoru, savijenosti od 12% i duljinom tetive od 7,5 metara. Ukupni promjer rotora iznosi 20 metara. [23]



Slika 3.7. Primjer 3D modela kanala korištenog kod horizontalnih turbina [23]

Slika 3.7. predstavlja graf iskoristivosti kanalne turbine za 3 modela oštrica različitih debljina.



Slika 3.8. Ovisnost koeficijenta iskoristivosti o koeficijentu brzohodnosti kanalne turbine za 3 različita tipa oštrica [23]

Moguće je zaključiti da kombinacija modela prije spomenutog kanala sa oštricama NACA-0024 prelazi vrijednost iskoristivosti Betzovog koeficijenta. Razlog tomu je što je koeficijent iskoristivosti proračunat kao funkcija površine rotora, a ne sveukupne površine uređaja. Pošto znamo da turbina bez kanala sa istom površinom rotora ne može preći vrijednost Betzovog koeficijenta, to dovodi do zaključka da su kanalne turbine sposobne proizvesti veću količinu električne energije sa istom površinom rotora, što znači da imaju veću energetska gustoću. Kada bi se za kanalne turbine u obzir uzela površina cijelog uređaja, ne bi prelazile granicu Betzovog koeficijenta.

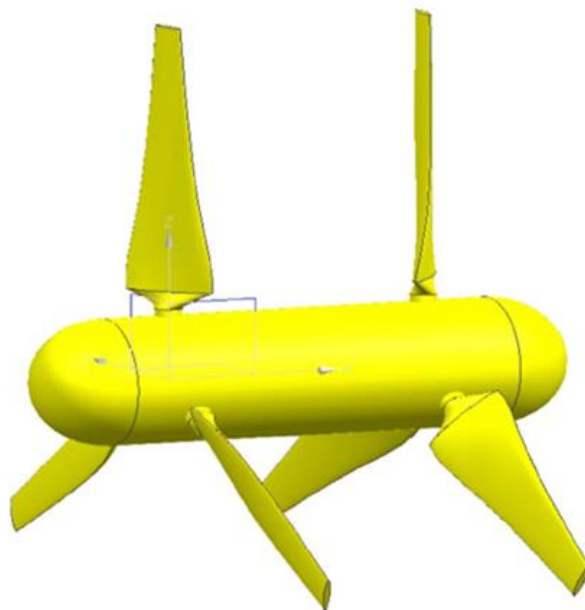
3.1.2. Dvosmjerna horizontalna turbina

Kako bismo optimizirali efikasnost i isplativost turbina, također je potrebno obratiti pažnju na kretanje fluida u koji su turbine uronjene te na koji način se energija može maksimalno iskoristiti. Pošto su plimne struje vrsta morskih struja koje svoj smjer mjenjaju ovisno o naizmjeničnoj pojavi plime i oseke, potrebno je istražiti dizajn turbine koja može pohraniti energiju iz oba smjera strujanja. Svi dosada spomenuti modeli su bile turbine koje su dizajnirane za pohranjivanje energije iz jednog smjera strujanja morskih (ili plimnih) struja, te je potrebno razmotriti model dvosmjerne horizontalne turbine.

Postoje tri osnovne izvedbe turbina za rad u dvosmjernim strujama:

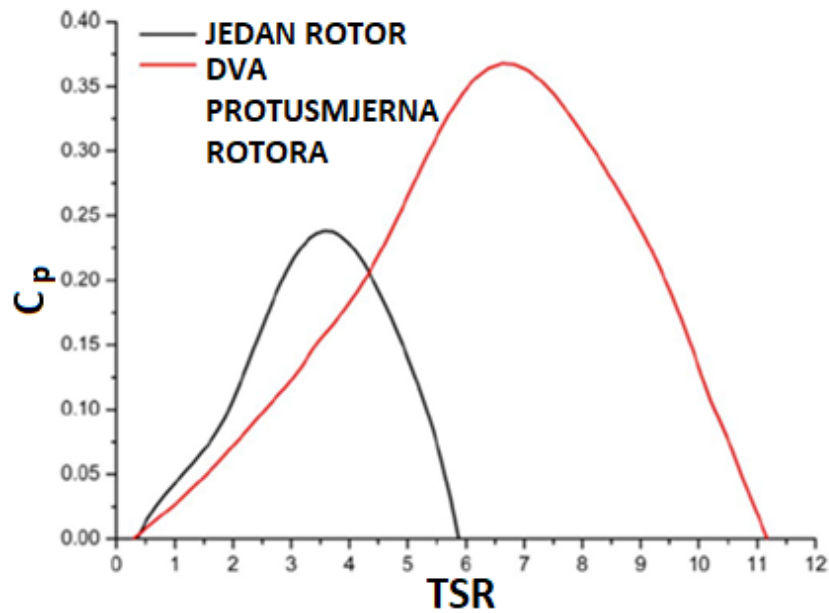
1. Klasična jednosmjerna turbina s jednim setom nepomičnih oštrica, gdje se cijela turbina zakreće za 180 stupnjeva
2. Dvosmjerna turbina, izvedena na takav način da posjeduje jedan set oštrica koji se može zakretati za 180 stupnjeva
3. Dvosmjerna turbina, izvedena na takav načina da posjeduje dva seta oštrica i rotor koji se može okretati u oba smjera [24]

Na slici 3.9. prikazan je 3D model dvosmjerne horizontalne turbine sa dva seta oštrica, gdje svaki set ima tri oštrice.



Slika 3.9. 3D model dvosmjerne horizontalne turbine [24]

Jedan set oštrica dominira u stvaranju zakreta kada se pojavljuje struja plime, a drugi kada se pojavljuje struja oseke. Oba seta oštrica su povezani na isti rotor koji se može rotirati u oba smjera. Rotor također može biti izveden na način da svaki set oštrica ima zaseban rotor koji se može okretati samo u jednom smjeru.



Slika 3.10. Krivulja ovisnosti koeficijenta iskoristivosti o koeficijentu brzohodnosti pri pohrani energije iz jednog rotora (crno) te iz dva protusmjerna (crveno) [24]

Iz grafa je vidljivo da je koeficijent iskoristivosti pri optimalnom koeficijentu brzohodnosti povećan za više od 10% kada se koriste dva rotora koji rotiraju u suprotnim smjerovima. Također je bitno istaknuti da je vrijednost optimalnog koeficijenta brzohodnosti veća kada se koriste dva rotora. To znači da za istu brzinu strujanja medija optimalnu iskoristivost postizemo pri većoj rotacijskoj brzini turbine.

3.2. Komercijalni projekti horizontalnih turbina

3.2.1. SeaGen

SeaGen turbina je prva turbina za pretvorbu energije morskih struja koja je dosegla razinu razvijenosti za komercijalnu upotrebu. Razvila ju je tvrtka Marine Current Turbine te je turbina puštena u pogon u srpnju 2008. godine nedaleko od sela Strangford u Sjevernoj Irskoj.



Slika 3.11. SeaGen turbina, podignuta iznad razine mora zbog održavanja [25]

SeaGen projekt uključuje dvije horizontalne turbine od dvije oštrice, zasebnih nazivnih snaga 600 kW, to jest ukupne nazivne snage od 1,2 MW. Težina cijelog uređaja je iznosila oko 1000 tona, te se uređaj do mjesta instalacije moralo dovući tegljačem. Nakon toga je proces instalacije trajao 14 dana, pri čemu se sustav priključio na mrežu te fiksirao na morsko dno. Promjer rotora turbina je iznosio 43 metra. Dizajnirao ju je inženjer Peter Fraenkel, na takav način da su dva rotora pogonila generator koji je slao električnu energiju u mrežu sela Strangford.

Rotori su pretvarali energiju morskih struja nakon što je brzina strujanja bila brža od 1 m/s. Pri maksimalnoj brzini, vrhovi oštrica su se kretali brzinom od 12 m/s. Oštrice su se okretale brzinom od 14 okretaja po minuti te pogonile reduktor.

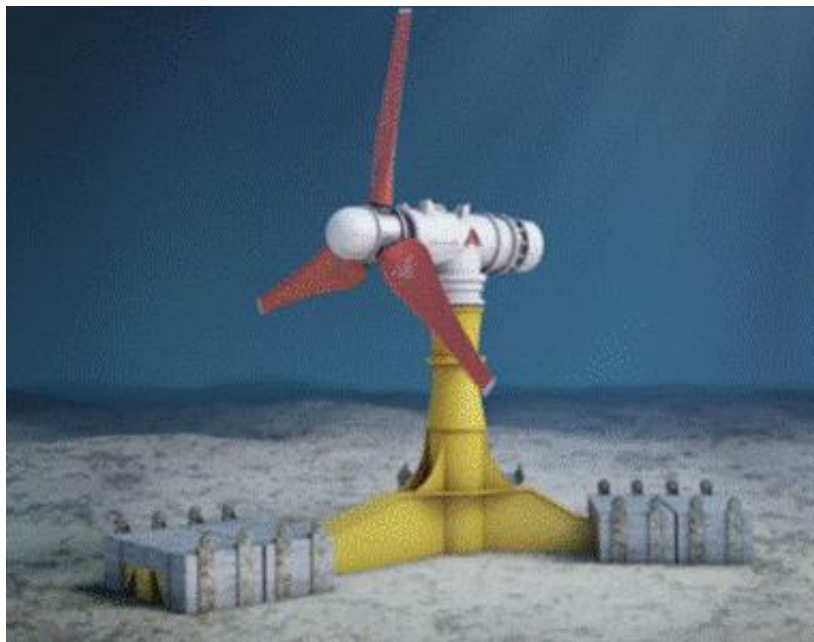
Projekt je dosegao važnu prekretnicu u rujnu 2012. godine, kada je turbina proizvela ukupno 5 GWh energije od trenutka kada je puštena u pogon. Ta količina energije bila je dostatna za pokrivanje potreba potrošnje 1500 kućanstava sela Strangford na godišnjoj bazi. Turbina je proizvela ukupno 11,6 GWh električne energije do srpnja 2019. godine, nakon čega je uspješno

maknuta iz pogona. Cijeli projekt se financirao iz više izvora, a ukupni troškovi su iznosili 12 milijuna funti.

3.2.2. MeyGen

MeyGen projekt je trenutno najveći planirani projekt vezan uz pretvorbu energije morskih struja na svijetu, s obzirom na nazivnu snagu koja se planira postići, koja treba iznositi 398 MW. Projekt se trenutno nalazi u prvoj od sveukupno planirane četiri faze, gdje je postignuta nazivna snaga od 6 MW pomoću četiri turbine pojedinih nazivnih snaga od 1,5 MW. Jedan od ključnih ispunjenih ciljeva u prvoj fazi projekta jest činjenica da je instalacija više od jedne turbine na jednoj lokaciji, to jest niza turbina na morske struje (eng. *Ocean current turbine array*) tehnološki izvediva i komercijalno isplativa. Projekt se nalazi na lokaciji zaljeva Gills, između obale sjevernoistočne Škotske i škotskog otoka Stroma. Razlog odabira lokacije je činjenica da prije spomenuti otok i obala stvaraju prolaz unutar kojeg se događa ubrzanje protoka morskih struja.

Iako se projekt sastoji od četiri turbine, u nizu se nalaze dvije različite izvedbe turbina, turbina AR1500 proizvedena od strane tvrtke SIMEC Atlantis Energy te tri AH1000 MK1 turbine proizvedene od strane tvrtke Andritz Hydro Hammerfest.



Slika 3.12. AR1500 turbina [26]

Svaka turbina ima 3 oštrice te promjer rotora od 18 metara. Položaj oštrica se može mijenjati kako bi se instalirani kapacitet turbine održavao konstantnim. Turbine također posjeduju mogućnost okretanja gdje se turbina može okrenuti pri izmjeni plime i oseke kako bi se energija mogla pohraniti iz oba smjera. [27] To znači da su obje izvedbe turbina zapravo dvosmjerne.

Iako je tek u prvoj fazi, projekt je od prvog puštanja u pogon u studenom 2016. do danas ostvario razne ciljeve. U kolovozu 2017. je dosegao razinu od 1 GWh električne energije izvezene u mrežu, dok je u ožujku 2023. dosegao razinu od 51 GWh. U ovoj fazi se prema prosječnoj potrošnji kućanstava u Ujedinjenom Kraljevstvu procjenjuje da projekt može opskrbiti oko šest tisuća kućanstava električnom energijom.

U sljedeće tri faze projekta, planirana je druga faza, to jest proširenje niza turbina na instaliranu nazivnu snagu od 28 MW u drugoj fazi koja je odobrena od strane Vlade Ujedinjenog Kraljevstva [28] koja bi trebala biti puštena u pogon 2027. godine, treća faza od 52 MW te četvrta faza od 312 MW, koje su zasad samo u planu.

3.2.3. O2 Orbital Marine Power

O2 turbina, proizvedena od strane tvrtke Orbital Marine Power je turbina sa najvećom instaliranom snagom od 2 MW. Puštena je u pogon u srpnju 2021. u otočju Orkney, u sjeveroistočnom dijelu Škotske, gdje brzina strujanja plimnih struja doseže 3 m/s.



Slika 3.13. O2 turbina, sa podignutim oštricama u svrhu održavanja [29]

Sustav se sastoji od dvije horizontalne turbine, od kojih svaka ima dvije oštrice, zasebnih nazivnih snaga od 1 MW. Posebnost izvedbe je što sustav nije fiksiran za morsko dno, već povezan na plutajuću platformu duljine 74 metra. Platforma se ne kreće potpuno slobodno, već je povezana sa dva kabela na morsko dno. Promjer rotora zasebnih turbina iznosi 20 metara, ukupne površine preko 600 kvadratnih metara. Predviđa se da će sustav proizvoditi dovoljno električne energije da pokrije potrebe preko dvije tisuće kućanstava u sjevernim dijelovima Škotske.

3.2.4. OpenHydro

OpenHydro turbina, proizvedena od strane istoimene tvrtke, je jedan od najvećih dosadašnjih projekata koji uključuje vrstu kanalne turbine. Puštena je u pogon 2005. godine te je imala nazivnu snagu od 250 kW. Također je to prva turbina koja je spojena na mrežu i koja je proizvela energiju u Ujedinjenom Kraljevstvu. [30]

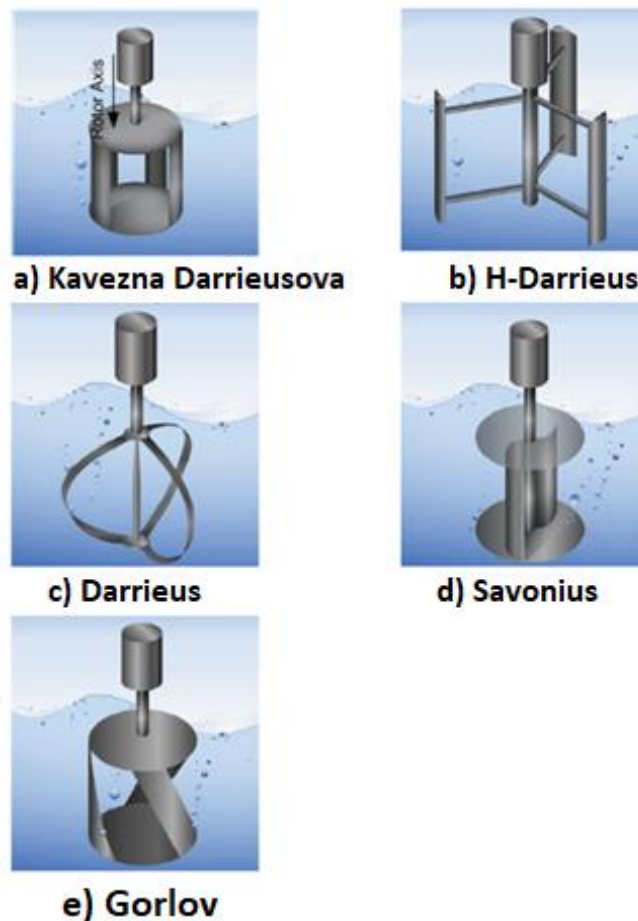


Slika 3.14. OpenHydro turbina, podignuta u svrhu održavanja [30]

Promjer turbine iznosi 6 metara, izvedba turbine je kanalna, ali otvorenog tipa gdje nema središta turbine već 24 oštrice povezane na kanal turbine, djelomično zbog očuvanja morske faune. Turbina se uranja u more pomoću hidrauličkog postolja koje je povezano sa dva čelična stupa na kojima se turbina može kretati gore-dolje, što smanjuje vrijeme i troškove održavanja. Proivodač je konstantno bio u koraku s tehnologijom te je u travnju 2014. u pogon puštena ista kanalna turbina 7. generacije koja je u pogonu provela oko 10000 sati, no projekt je otkazan u sprnju 2018.

3.3. Turbine s vertikalnom osi vrtnje

Turbine s vertikalnom osi vrtnje se u teoriji razlikuju od turbina s horizontalnom osi vrtnje samo po osi vrtnje, to jest po činjenici da os vrtnje nije paralelna sa smjerom rotacije oštrica, već okomita. U praksi se vetikalne turbine više razlikuju od horizontalnih na nekoliko načina, te je potrebno zasebno istražiti njihove karakteristike i tehnološki doseg.



Slika 3.15. Glavne izvedbe vertikalnih turbina [31]

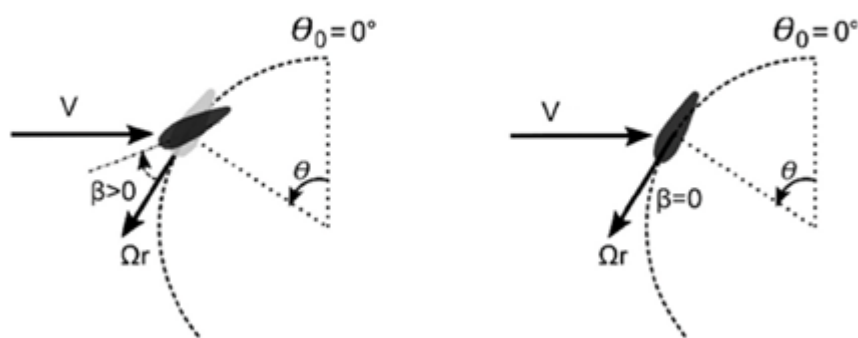
Razlike između pojedinih izvedbi vertikalnih turbina za morske struje potječu iz dva osnovna dizajna, Darrieusove i Savoniusove turbine. Darrieusova i Savoniusova turbina su, kao i obična propelerna horizontalna turbina, prije korištenja za pretvorbu energije morskih struja bile korištene isključivo kao vjetroturbine. Iz Darrieusove turbine se razvijaju određene podvrste turbina, poput H-Darrieusove turbine, kavezne Darrieusove turbine te Gorlov turbine. Dodavanje kanala ili postizanje dvosmjernosti u svrhu povećanja iskoristivosti se rjeđe nalazi u eksperimentalnim projektima kod svih podvrsta vertikalnih turbina. Većinom se uspoređuju podvrste vertikalnih turbina s obzirom na broj oštrica, zakrenutost oštrica, te s obzirom na dizajn istih, gdje oštrice mogu biti ravne ili spiralne.

3.3.1. Darrieusova turbina

Darrieusovu turbinu je izumio francuski inženjer Georges Jean Marie Darrieus, koji je 1931. godine predstavio prvi patent turbine. Darrieusova turbina je prvotno bila korištena kao vjetroturbina, a kasnije je, kao i horizontalna propelerna turbina, svoju primjenu našla u pretvaranju energije morskih struja.

Jedan od načina na koji se koeficijent iskoristivosti Darrieusove turbine, pogotovo kod H-Darrieusove turbine može povećati je mjenjanjem kuta nagiba oštrica.

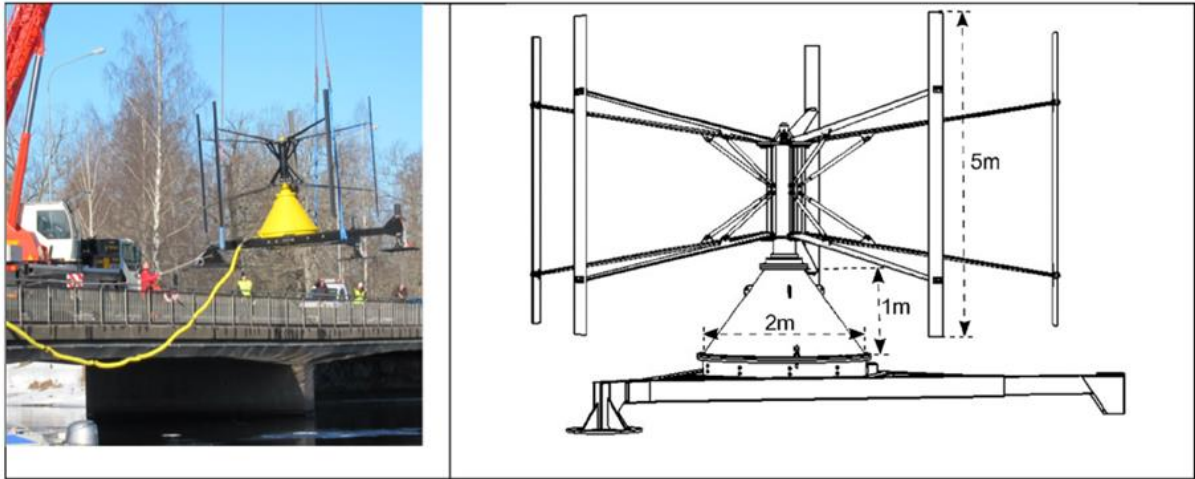
Na slici 3.16. prikazana je oštrica H-Darrieusove turbine u koordinatnom sustavu, sa naznačenim smjerom protoka fluida v , vektorom tangencijalne brzine oštrice, zapisan kao umnožak kutne brzine i polumjera rotora Ωr , azimutalniim kutem θ , koji predstavlja kut između oštrice turbine i horizontalne osi, te kutem nagiba oštrice β , koji predstavlja kut između tangente na rotor i simetrale oštrice.



Slika 3.16. Položaj oštrice H-Darrieusove turbine kada je kut nagiba oštrice pozitivan (lijevo) te kada je kut oštrice nepromjenjen (desno) [32]

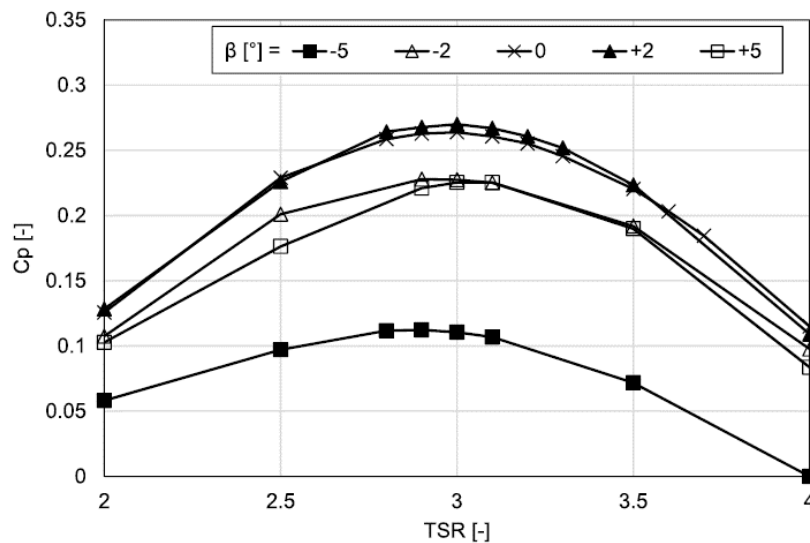
Kut nagiba je jednak nuli kada je os simetrije oštrice paralelna sa tangentom rotora, povećava se na pozitivnu vrijednost kada se oštrica okreće u smjeru kazaljke na satu, te se smanjuje i može postati negativan kada se oštrica okreće suprotno od smjera kazaljke na satu. Mjenjanjem kuta nagiba oštrice se može promjeniti način na koji strujanje fluida utječe na brzinu vrtnje same turbine, pa s time i koeficijent iskoristivosti turbine, te je za turbinu potrebno pronaći optimalni kut nagiba oštrice.

Na slici 3.17. prikazana je pokusna H-Darrieusova turbina nazivne snage 7,5 kW, sa 5 oštrica duljine 5 metara, uronjenih u fluid koji struji brzinom između 0,7 m/s i 1,5 m/s. Turbina je u svrhu proizvodnje električne energije povezana na sinkroni generator s permanentnim magnetom, čija iskoristivost iznosi 87%. [32] Mjerenja su izvedena tako da se mjenjalo kut nagiba oštrica na 5 različitih vrijednosti, te se za svaku vrijednost nagiba mjerila ovisnost koeficijenta iskoristivosti o koeficijentu brzohodnosti.



Slika 3.17. Eksperimentalni model H-Darrieusove turbine [32]

Na slici 3.18. prikazana je ovisnost koeficijenta iskoristivosti o koeficijentu brzohodnosti za različite kuteve nagiba oštrica.



Slika 3.18. Krivulja ovisnosti koeficijenta iskoristivosti o koeficijentu brzohodnosti za različite vrijednosti kuta nagiba oštrica [32]

Moguće je zaključiti da se pri bilo kojem kutu nagiba oštrice maksimalni koeficijent iskoristivosti postiže za približno isti koeficijent brzohodnosti. Također je moguće zaključiti da, pri fiksnom koeficijentu brzohodnosti, odnos između koeficijenta iskoristivosti i kuta nagiba oštrice nije proporcionalan niti obrnuto proporcionalan, već turbina postiže najveći koeficijent iskoristivosti pri optimalnom kutu nagiba oštrica, čija vrijednost može ovisiti o izvedbi turbine.

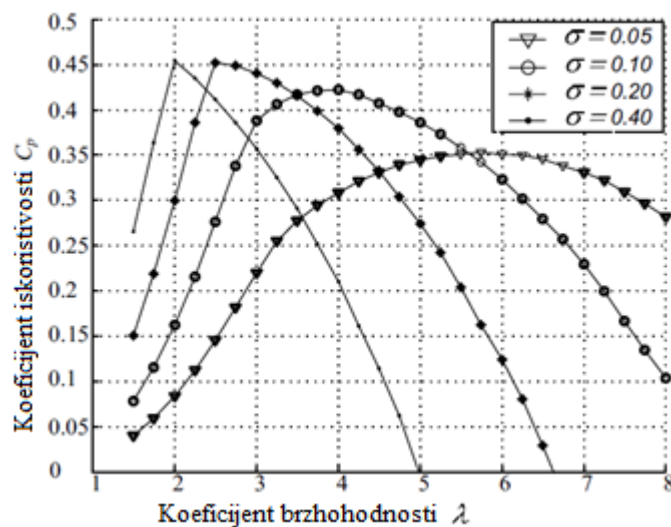
Jedan od načina pomoću kojega je također moguće povećati iskoristivost Darriesuove turbine jest traženjem optimalnog koeficijenta čvrstoće (engl. *Solidity*). Koeficijent čvrstoće se može definirati sljedećim izrazom: [33]

$$\sigma = \frac{Nc}{d} \quad (3-47)$$

Gdje σ predstavlja koeficijent čvrstoće, N broj oštrica koje se nalaze na rotoru turbine, c duljinu tetive jedne oštrice te d predstavlja promjer rotora. Za određeni promjer rotora, broj oštrica i duljina tetive oštrice se može mijenjati, te se tako mijenja i koeficijent čvrstoće.

Povećanjem broja oštrica, koeficijent čvrstoće turbine se povećava te je inducirani moment turbine veći, što joj omogućava lakše pokretanje. Smanjenjem broja oštrica se smanjuje koeficijent čvrstoće, s kojim se smanjuje i turbulencija fluida, povećava se protok te se povećava koeficijent iskoristivosti. Turbine s manjim brojem oštrica uglavnom rade pri većem broju okretaja. [33]Mjenjanem koeficijenta čvrstoće, kao funkcije broja oštrica, možemo dobiti informacije o ovisnosti koeficijenta iskoristivosti o koeficijentu brzohodnosti za različite koeficijente čvrstoće.

Dok se kut nagiba oštrice mijenjao na eksperimentalnom modelu turbine, gdje je postojao upravljački mehanizam koji je mijenjao kut nagiba, koeficijent čvrstoće, pogotovo ako se žele mijenjati sva tri parametra koja utječu na njega, je potrebno ispitiati na simulacijskom modelu turbine. Razlog tome je što dizajniranje većeg broja turbina različitih promjera rotora, broja oštrica te duljine tetiva oštrica financijski neisplativo ako je cilj promatranje utjecaja samo jednog koeficijenta.



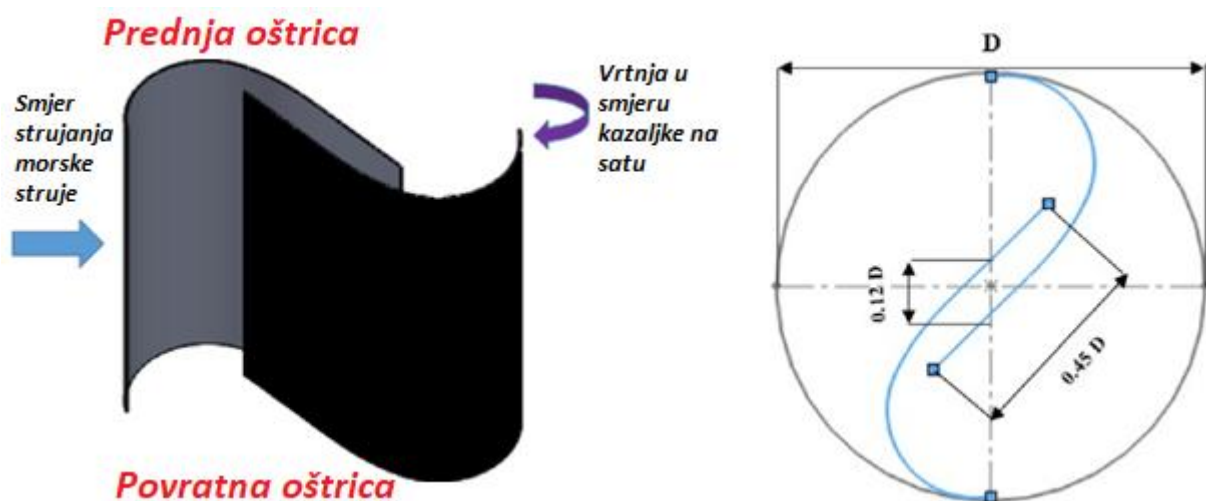
Slika 3.19. Krivulja ovisnosti koeficijenta iskoristivosti o koeficijentu brzohodnosti za različite koeficijente čvrstoće turbine [33]

Moguće je zaključiti da se najveći koeficijent iskoristivosti postiže pri koeficijentu čvrstoće iznosa 0,40, pri koeficijentu brzohodnosti iznosa 2. Povećavanjem koeficijenta čvrstoće se smanjuje iznos koeficijenta brzohodnosti pri kojem je koeficijent iskoristivosti turbine najveći. Pošto se s povećavanjem koeficijenta čvrstoće povećava i broj oštrica turbine, turbina će optimalan rad postići pri manjoj brzini vrtnje. Smanjivanjem koeficijenta čvrstoće se povećava brzina vrtnje pri kojoj turbina postiže maksimalnu iskoristivost.

3.3.2. Savoniusova turbina

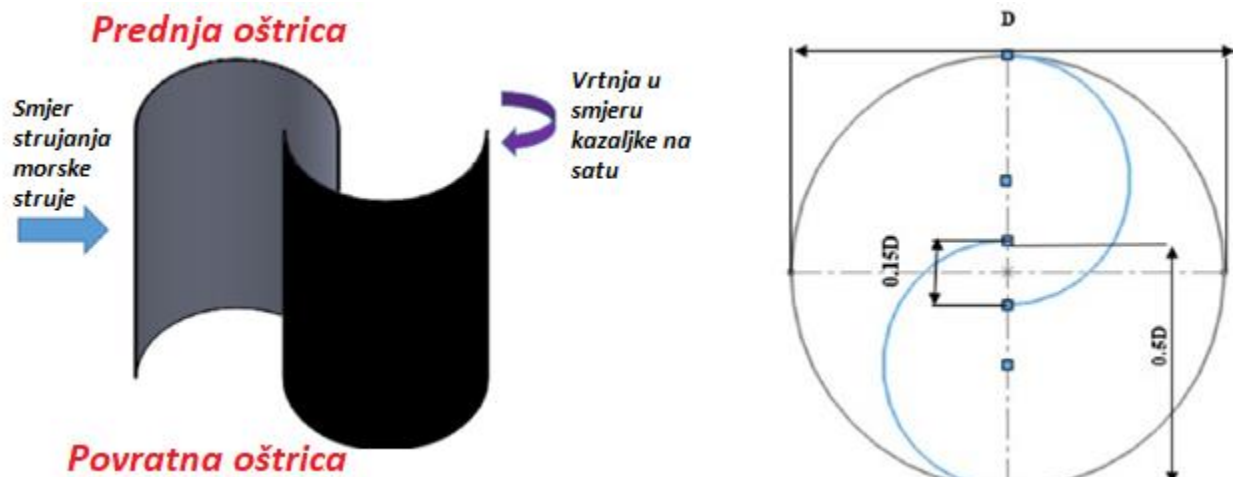
Savoniusova turbina je vrsta vertikalne turbine na morske struje koju je izumio finski arhitekt Sigurd Johannes Savonius 1922. godine, čija je prvotna uloga bila pretvaranje energije vjetrova, to jest uloga vjetroturbine. Savoniusova turbina se najčešće izvodi sa dvije oštrice, koje se rotiraju zajedno sa dvije krajnje ploče kružnog oblika na koje su oštrice povezane. Oštrice su izvedene u zakrivljenom obliku, gdje svaka oštrica ima konkavnu i konveksnu plohu. Fluid svojim strujanjem dodiruje konkavnu plohu jedne oštrice, te se ona tada zove prednja oštrica. Prednja oštrica se tada rotira oko vertikalne osi, na kojoj se također nalazi rotor, koji je postavljen u između dvije oštrice, tako da prolazi kroz središte krajnjih ploča. Prostor između dvije oštrice ne mora biti potpuno ispunjen pomoću rotora, već se može postojati i praznina. Oštrica čiji konveksni dio dodiruje strujanje fluida se naziva povratna oštrica.

Postupak pomoću kojeg se koeficijent iskoristivosti Savoniusove turbine može povećati jest mjenjanjem oblika oštrice, gdje postoji nekoliko izvedbi koje je potrebno razmotriti. U svakoj izvedbi, osim oblika oštrice, mjenjati se može i razmak između oštrica te duljina pri kojoj se oštrice međusobno preklapaju.



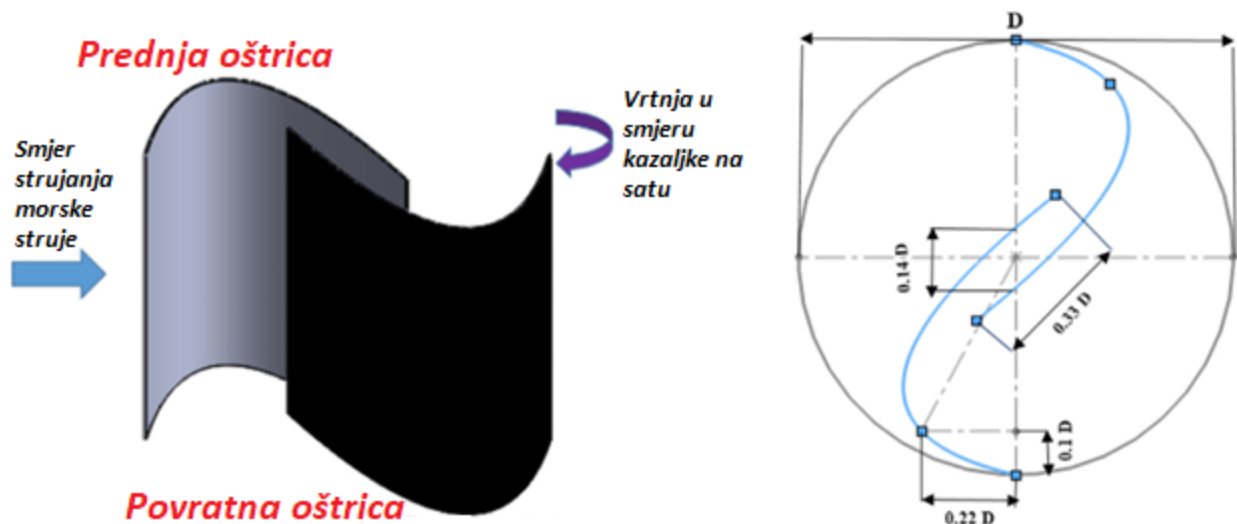
Slika 3.20. Konvencionalna Savoniusova turbina [34]

Oštrice konvencionalne Savoniusove turbine su izvedene na način da su spojene na krajnje ploče promjera D , gdje su obje oštrice zakrivljene sve dok se ne počnu preklapati u odnosu na horizontalnu os. Kada se oštrice počnu preklapati, poprimaju ravni oblik. Razmak između oštrica iznosi $0,12D$ gledajući s obzirom na vertikalnu os, dok duljina prekapanja iznosi $0,45D$ kada gledamo s obzirom na os ravnog dijela oštrice.



Slika 3.21. Nova konvencionalna Savoniusova turbina [34]

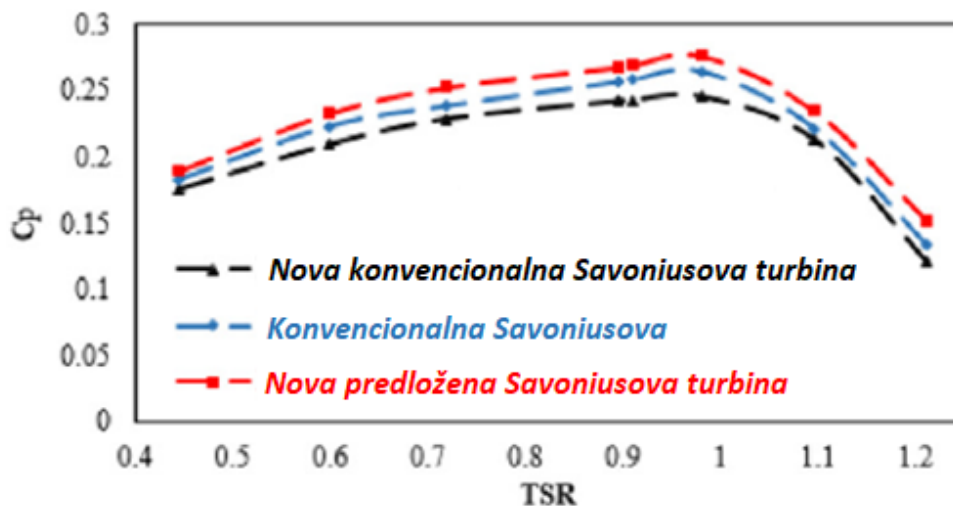
Oštrice nove konvencionalne Savoniusove turbine su također spojene na krajnje ploče promjera D , ali su oštrice izvedene u polukružnom obliku, te se ne preklapaju. Razmak između oštrica s obzirom na horizontalnu os iznosi $0,15D$.



Slika 3.22. Nova predložena Savoniusova turbina [34]

Oštrice nove predložene Savoniusove turbine su paraboličnog oblika, gdje zakrivljenost postoji duž cijele oštrice. Razmak između oštrica s obzirom na horizontalnu os iznosi $0,14D$, a preklapanje iznosi $0,33D$.

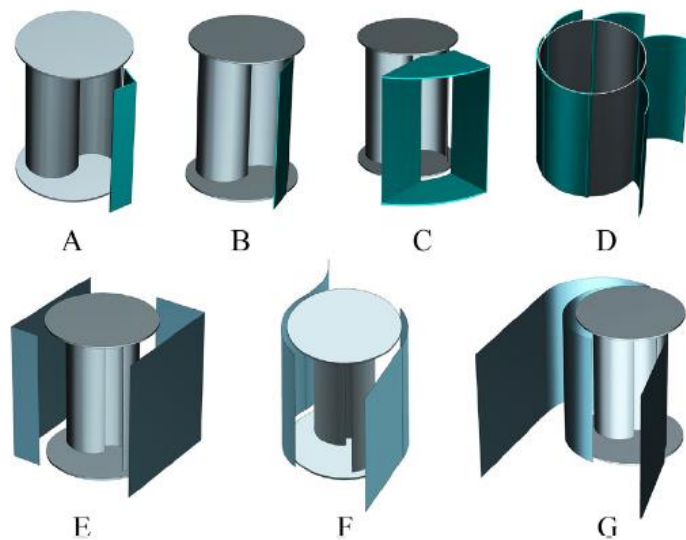
Pošto sve tri izvedbe turbine imaju različite oblike oštrica, iznose razmaka između oštrica te duljine preklapanja, potrebno je promotriti koja izvedba turbine ima najveći koeficijent iskoristivosti turbine, što je promatrano na matematičkom modelu turbine.



Slika 3.23. Krivulja ovisnosti koeficijenta iskoristivosti o koeficijentu brzohodnosti za tri navedene izvedbe Savoniusove turbine [34]

Moguće je zaključiti da bilo koji raspon koeficijenta brzohodnosti najveći koeficijent iskoristivosti ima Savoniusova turbina sa paraboličnim oštricama, zatim slijedi konvencionalna Savoniusova turbina, te općenito najmanji koeficijent iskoristivosti ima Savoniusova turbina sa polukružnim oštricama.

Još jedan od načina pomoću kojega se, neovisno o obliku oštrice, može povećati koeficijent iskoristivosti Savoniusove turbine jest korištenje deflektora. Deflektori kod vertikalnih turbina služe sličnoj svrsi kao kao kanali kod horizontalnih turbina, usmjeravaju tok fluida prema oštricama i rotoru turbine kako bi se postigla veća brzina strujanja fluida, samim time i veća brzina okretanja turbine te veći koeficijent iskoristivosti. Deflektori se mogu izvesti na više načina, gdje mogu varirati duljina, debljina te sami oblik deflektora, a turbina također može imati više ugrađenih deflektora ovisno o potrebi.



Slika 3.24. Oblici deflektora kod Savoniusove turbine [35]

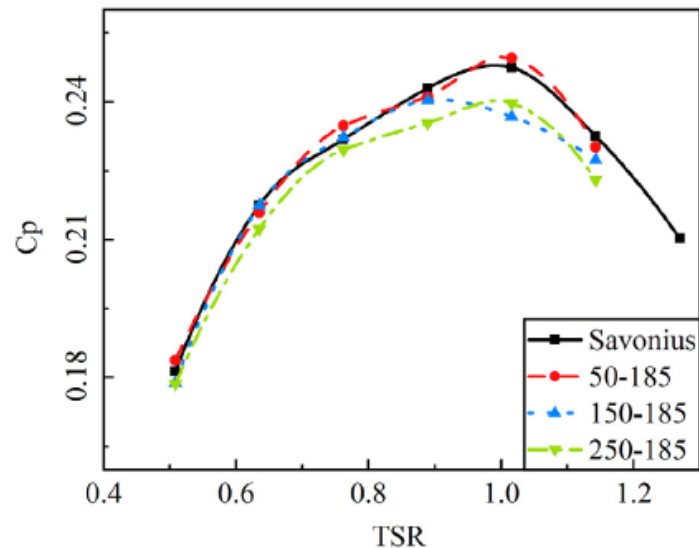
S obzirom da postoje različite vrste deflektora te se za svaku vrstu deflektora može promatrati promjena iskoristivosti turbine kada se promjeni duljina, debljina te kut nagiba deflektora u odnosu na turbinu, što nije lako eksperimentalno izvesti odjednom. Promatrat će se utjecaj promjene duljine jedne vrste deflektora na eksperimentalnom postavu turbine.



Slika 3.25. Eksperimentalni postav Savoniusove turbine sa ravnim deflektorom [35]

Eksperimentalni postav se sastoji od Savoniusove turbine sa polukružnim oštricama, uronjene u spremnik za vuču ispunjen vodom, duljine 10 metara, širine 1 metra te visine od 1,5 metara.

Visina turbine iznosi 25 centimetara, dok visina deflektora iznosi 50 centimetara. Brzina kojom se turbina provlači kroz spremnik iznosi 0,5 m/s. Promjer radijusa turbine je održan na konstantnoj vrijednosti od 18,5 centimetara, dok je duljina deflektora mjenjana na vrijednosti od 5, 10 te 15 centimetara. [35] Pošto brzina provlačenja zapravo odgovara brzini strujanja fluida, potrebno je mjeriti brzinu okretanja turbine kako bi se mogao odrediti koeficijent brzohodnosti, te mjeriti izlaznu snagu turbine kako bi se odredila krivulja ovisnosti.



Slika 3.26. Krivulja ovisnosti koeficijenta iskoristivosti o koeficijentu brzohodnosti za različite duljine deflektora kod Savoniusove turbine [35]

Moguće je zaključiti da se pri duljini deflektora od 50 centimetara može postići najveći koeficijent iskoristivosti. Duljina deflektora ne mijenja znatno koeficijent brzohodnosti pri kojem se postiže maksimalni koeficijent iskoristivosti. Crna krivulja ne predstavlja mjerenja sprovedena u eksperimentu, već aproksimaciju krivulje za Savoniusovu turbinu s deflektorom.

3.4. Komercijalni projekti vertikalnih turbina

3.4.1. Instream Energy Systems

Instream Energy Systems je američka tvrtka koja se bavi proizvodnjom vertikalnih, točnije H-Darrieusovih turbina u svrhu proizvodnje električne energije. Tvrtka trenutno ima u pogon puštene turbine na tri lokacije:

1. Roza Kanal, Yakima, Washington, SAD
2. Nedaleko od obale Irskog mora, Anglesey, Ujedinjeno Kraljevstvo
3. Brana Duncam, Britanska Kolumbija, Kanada [36]



Slika 3.27. Instream Energy Systems H-Darrieusova turbina [36]

Nazivna snaga turbine iznosi 25 kW, te se pri nazivnoj snazi turbina okreće brzinom od 46,4 okretaja po minuti. Turbina ima 3 oštrice duljine 1,5 metara, a ukupna površina rotora iznosi 4,5 m². Ukupna težina turbine iznosi 496 kg, a životni vijek nakon instalacije na određenoj lokaciji je procenjen na minimalno 25 godina. Turbina proizvodi električnu energiju kada je brzina strujanja morskih struja u rasponu od 1 m/s do maksimalno 3 m/s.[37]

3.4.2. OceanQuest

OceanQuest je projekt izveden od strane francuske tvrtke HydroQuest, u kojem se također koriste H-Darrieusove turbine, ali u kombinaciji sa kanalima, te se također koristi niz turbina na istoj lokaciji.



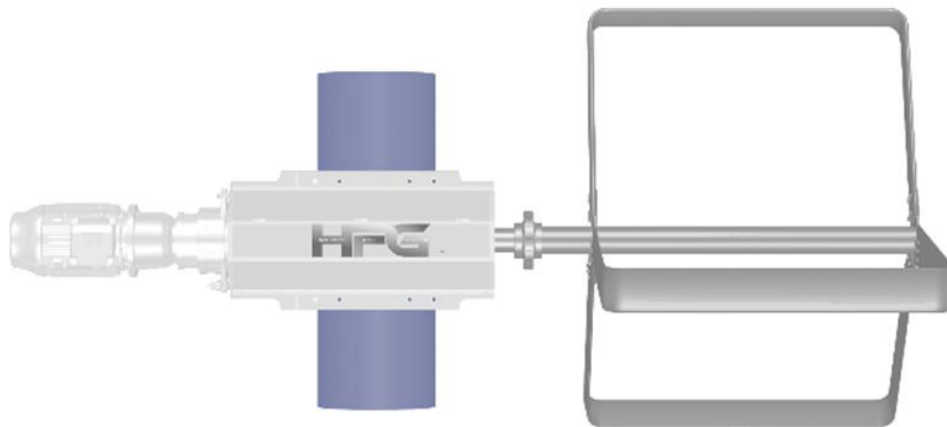
Slika 3.28. OceanQuest turbina [37]

OceanQuest turbina se sastoji ukupno od četiri H-Darrieusove turbine, od kojih svaka ima tri oštrice. Svaka od turbina se nalazi unutar zasebnog kanala. Kanali su međusobno povezani tako da se dvije turbine nalaze na vertikalnoj osi, te dvije turbine na horizontalnoj osi.

Ukupna nazivna snaga cijelog sustava iznosi 1 MW. Sustav je pušten u pogon u proljeće 2019. godine u Engleskom kanalu, nedaleko od grada Paimphol u sjeverozapadnoj francuskoj pokrajini Bretanji. Iako je životni vijek sustava procjenjen na jednu godinu, sustav je ostao u pogonu do listopada 2021. godine. Tvrtka trenutno u planu ima proizvesti novu generaciju istog tipa turbina sa nazivnom snagom od 2,5 MW, gdje bi se sustav od ukupne snage od 10 MW instalirao nedaleko od otoka Guernsey, također u Engleskom kanalu.

3.4.3. Hydrokinetic Power Generation Systems

Hydrokinetic Power Generation Systems (skraćeno HPG Systems) je tvrtka koja proizvodi dvije vrste H-Darrieusovih turbina, Evo10 i Evo25, u svrhu proizvodnje električne energije pomoću morskih struja iz oceana, ali također iz rijeka te kanala. Tvrtka trenutno testira svoje dvije vrste turbina na testnoj lokaciji u kanalu u francuskom gradu Bordeauxu, ali također ulazi u proces komercijalizacije.

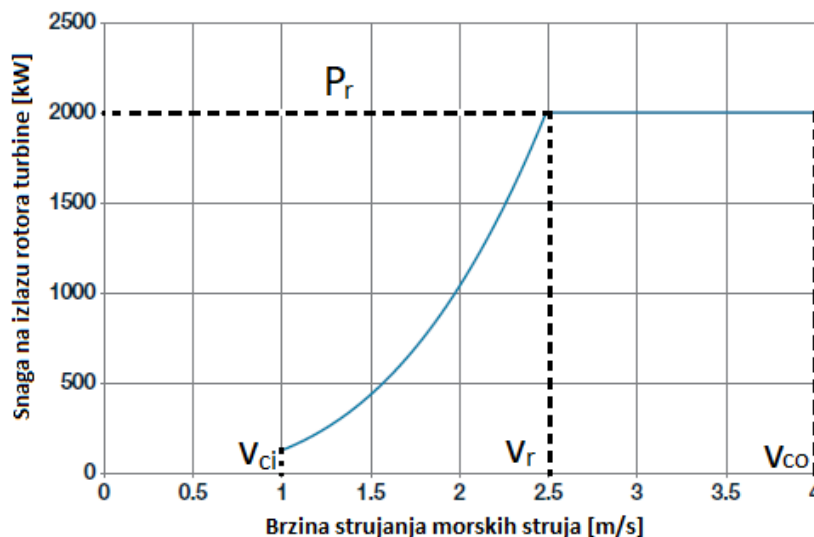


Slika 3.29. Evo25 turbina [38]

Evo25 turbina ima nazivnu snagu u iznosu od 25 kW te je namjenjena za brzine strujanja od 1 m/s do 3 m/s, dok Evo10 turbina ima nazivnu snagu u iznosu od 10 kW te je namjenjena za brzine strujanja od 0,7 m/s do 2,4 m/s. Obje turbine su H-Darrieusovog tipa sa 3 oštrice, promjera rotora od 3 m te visine rotora od 2 m. Evo25 turbina se pri nazivnoj snazi vrti brzinom od 45 o/min dok Evo10 postiže brzinu od 45 o/min. [39]

4. PRORAČUN

Kako bi smo mogli odrediti količinu električne energije koju neka turbina može proizvesti u nekom vremenskom periodu, potrebno je poznavati krivulju snage određene turbina. Dok nam krivulja ovisnosti koeficijenta iskoristivosti o koeficijentu brzohodnosti govori kolika je iskoristivost turbine pri određenoj brzini strujanja morskih struja, krivulja snage turbine na morske struje nam govori koliku količinu električne energije turbina (zajedno u kombinaciji sa generatorom, tada naziva turboagregat) može proizvesti pri određenoj brzini strujanja morskih struja. Također je potrebno poznavati određene prijelomne vrijednost brzina pri kojima se krivulja snage, to jest ovisnost snage o brzini matematički mjenja.



Slika 4.1. Krivulja snage SeaGen turbine sa naznačenim prijelomnim vrijednostima brzina [40]

Prijelomne vrijednost brzina se mogu definirati na sljedeći način:

1. v_{ci} – Brzina uključenja (engl. *Cut-in velocity*) je minimalni iznos brzine strujanja morskih struja pri kojoj se turboagregat uključuje kako bi proizvodio električnu energiju. Ova vrijednost brzine uglavnom ne iznosi nula, što znači da pokretanjem turboagregata pri brzini uključenja turbina odmah proizvodi, ovisno o iskoristivosti, neku količinu električne energije.
2. v_r – Nazivna brzina (engl. *Rated velocity*) je brzina strujanja morskih struja pri kojoj turboagregat postiže nazivnu snagu. Nazivna snaga se održava sve do brzine isključenja.
3. v_{co} – Brzina isključenja (engl. *Cut-out velocity*) je maksimalan iznos brzine strujanja morskih struja koju turboagregat može podnijeti usprkos mehaničkim naprezanjima. Ako brzina strujanja pređe brzinu isključenja, sustav se gasi, što znači da snaga nadalje iznosi 0.

Krivulja snage turbine se nadalje može aproksimirati sljedećim matematičkim izrazom:

$$P_t = \begin{cases} 0, & 0 \leq v < v_{ci} \\ \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p, & v_{ci} \leq v < v_r \\ P_r, & v_r \leq v < v_{co} \\ 0, & v \geq v_{co} \end{cases} \quad (4-1)$$

4.1. Odabir turbina

U svrhu provođenja proračuna količine proizvedene električne energije pomoću turbina na morske struje odabrane su Evo10 i Evo25 turbine proizvedene od strane tvrtke HPG Systems, prethodno prikazanih na Slici 3.29. Dostupni tehnički podaci o turbinama su dani u Tablici 4.1.

Tablica 4.1. Tehnički podaci Evo10 i Evo25 turbina [39]

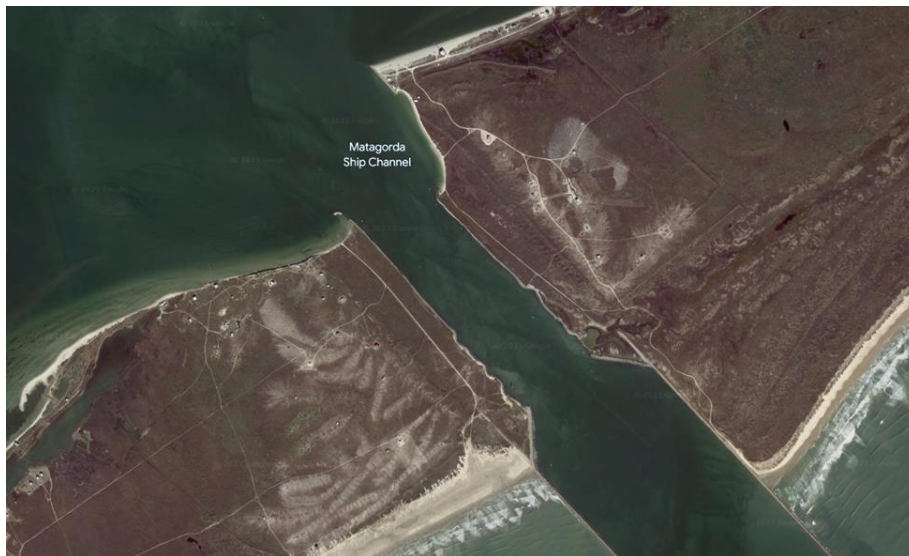
Proizvođač	HPG Systems	HPG Systems
Naziv turbine	Evo10	Evo25
Vrsta turbine	H-Darrieus	H-Darrieus
Broj oštrica	3	3
Promjer rotora [m]	3	3
Visina rotora [m]	2	2
Površina rotora [m ²]	6	6
Nazivna snaga [kW]	10	25
Brzina uključenja [m/s]	0,7	1
Nazivna brzina [m/s]	2	2,7
Brzina isključenja [m/s]	2,4	3

4.2. Odabir lokacije

Kako bi se mogla proračunati količina električne energije koju turbogenerator proizvede iz energije plimnih struja u nekom vremenskom intervalu, potrebno je pronaći bazu podataka koja nudi podatke o brzini i smjeru plimnih struja u nekom vremenskom intervalu. NOAA (*engl. National Oceanic and Atmospheric Association*) baza podataka nudi podatke o brzini plimnih struja, izraženoj u cm/s te smjeru, izraženom u stupnjevima za proizvoljno odabran vremenski interval. Podaci se prikupljaju na 74 različita mjerna mjesta diljem obalnog dijela SAD-a. Potrebno je odabrati lokaciju na kojoj je brzina plimnih struja dovoljno visoka kako bi u određenom

vremenskom intervalu brzina strujanja veća od brzine uključenja odabranih turbina, ali ne previsoka kako brzina ne bi bila veća od brzine isključenja turbina.

Odabrana je lokacija Matagorda brodski kanal, koja se nalazi na jugoistočnoj obali savezne države Teksas, gdje kanal omogućava tranzit plovila iz Meksičkog zaljeva u Teksas. Mjerenja brzine i smjera plimnih struja u kanalu su vršena na dubini od 4,5 m. Kanali općenito predstavljaju pogodno mjerno mjesto jer su izmjerene brzine plimnih struja veće u usporedbi sa mjernim mjestima na otvorenom moru, zbog suženog prostora kroz koji se odvija protok vode.



Slika 4.2. Satelitski prikaz Matagorda brodskog kanala

4.3. Obrada podataka

Nakon odabira lokacije na NOAA web-stranici se pojavljuje sučelje sa prikupljenim podacima o brzini i smjeru plimne struje unutar posljednjih 48 sati.



Slika 4.3. NOAA Sučelje za prikaz podataka [41]

Unutar sučelja se nalazi graf ovisnosti brzine i smjera plimne struje o vremenu, te tablica sa vrijednostima brzine i smjera sa naznačenim vremenom mjerenja. Iz tablice je vidljivo da su mjerenja vršena svakih 6 minuta, te će se ubuduće brzinu i smjer plimne struje između svaka dva uzorka mjerenja smatrati konstantnom kako bi ovisnost brzine i smjera plimne struje o vremenu bila kontinuirana. Za mjernu jedinicu brzine je potrebno odabrati cm/s, koji će poslije biti pretvoreni u m/s zbog pojednostavljenja proračuna. Najveći vremenski razmak za koji stranica odjednom dopušta prikaz i preuzimanje podataka iznosi 32 dana. Podatke je moguće preuzeti u obliku CSV (engl. *comma-separated values*) datoteke klikom na gumb „CSV“. Prednost korištenja CSV datoteke je mogućnost čitanja i obrade preuzetih podataka u MATLAB-u. Podaci za odabranu lokaciju nisu dostupni tijekom cijele godine, te je potrebno odabrati najveći mogući vremenski raspon unutar kojega su podaci dostupni. Ako je raspon veći od 32 dana, moguće je preuzeti više CSV datoteka te ih spojiti u jednu.

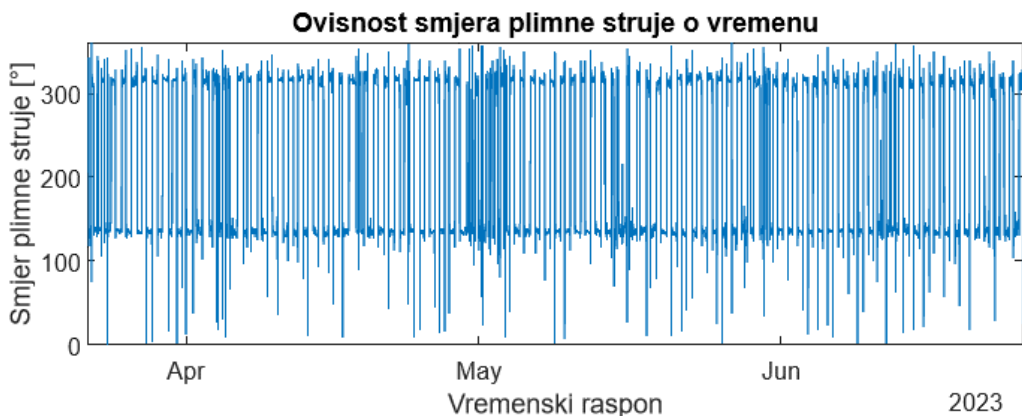
Odabran je vremenski raspon od 22. ožujka 2023. do 25. lipnja 2023. te je datoteka s podacima učitana u MATLAB. U datoteci se nalazi 22977 uzoraka mjerenja n_{uz} . Pošto je poznato da svaki uzorak posjeduje podatke o brzini i smjeru plimnih struja za vremenski raspon Δt od 6 minuta, moguće je izračunati vremenski raspon u minutama, satima ili danima za preuzete podatke.

$$t_{uk}[h] = \frac{n_{uz} * \Delta t}{60} = 2297,7 h \quad (4-2)$$

Pomoću obrađenih podataka moguće je prikazati grafove ovisnosti smjera i brzine plimnih struja o vremenu pomoću MATLAB-a.

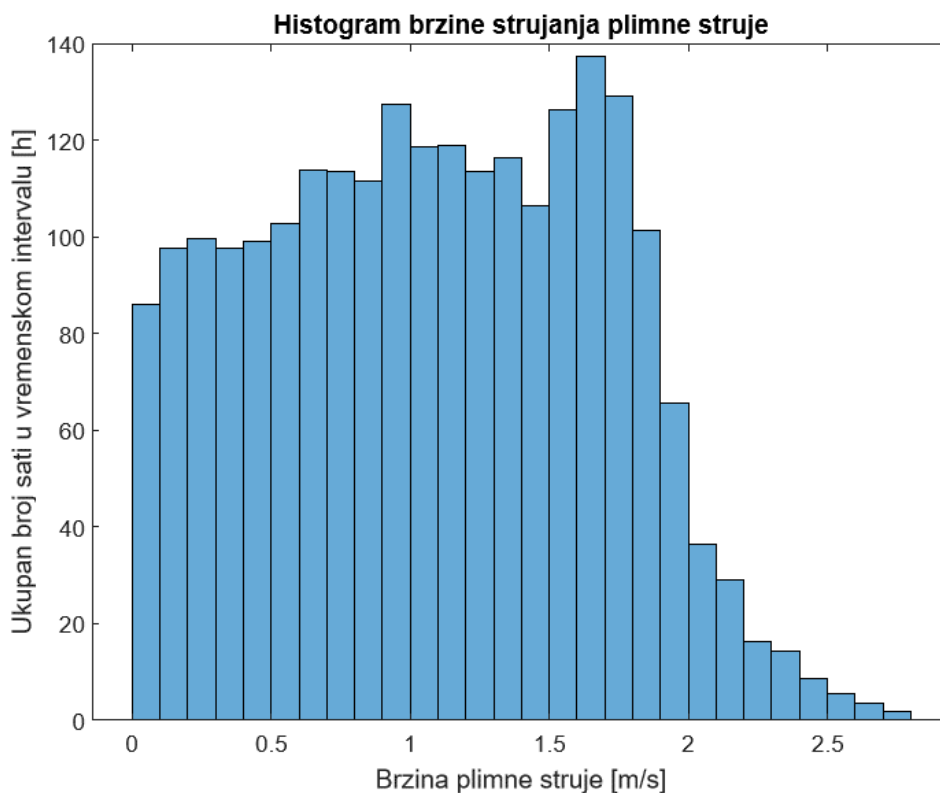


Slika 4.4. Graf ovisnosti brzine plimne struje o vremenu



Slika 4.5. Graf ovisnosti smjera plimne struje o vremenu

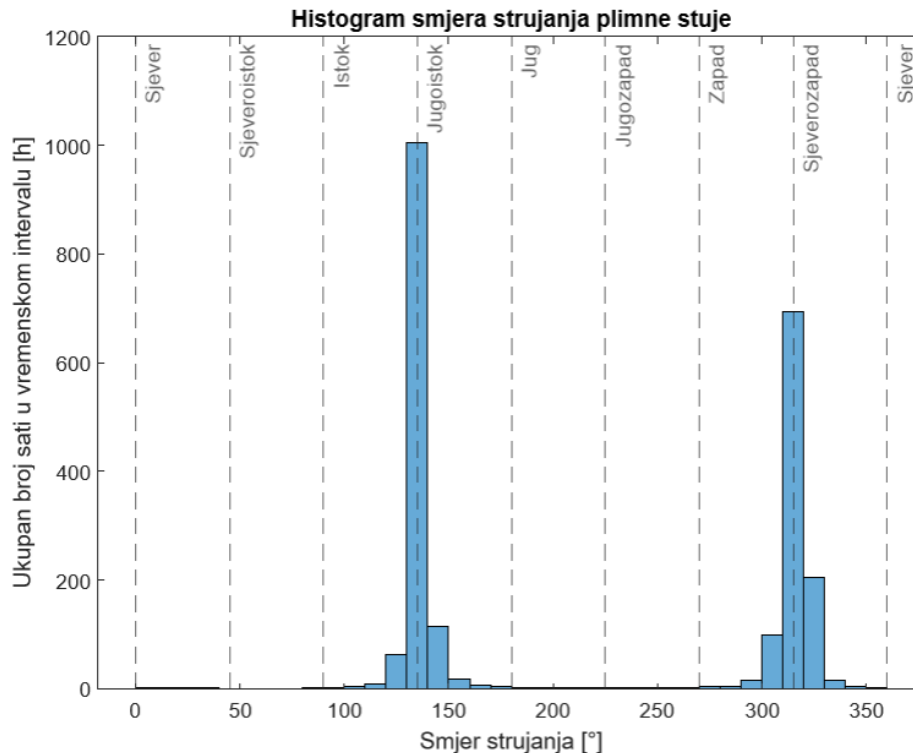
Zbog pojednostavljenja proračuna i bolje preglednosti podataka, podatke je također moguće prikazati u obliku histograma, gdje se dobiva ukupan broj sati za koji se brzina ili smjer plimne struje nalaze u određenom intervalu.



Slika 4.6. Histogram brzine strujanja plimne struje

Sa histograma brzine plimne struje moguće je zaključiti da se za odabranu lokaciju u odabranom vremenskom intervalu najčešće postiže brzina plimne struje između 1 m/s i 2 m/s a najrjeđe brzina preko 2 m/s.

Na isti način se mogu prikazati podaci o smjeru plimnih struja. Iako su odabrane turbine dvosmjerne, te smjer plimnih struja neće utjecati na izlaznu snagu turbina, histogram smjera je prigodno prikazati zbog potvrde vjerodostojnosti podataka. Pošto je odabrana lokacija kanal, te je iz satelitske slike vidljivo da se kanal proteže u smjeru jugoistok-sjeverozapad, plimne struje bi većinu vremena trebale poprimati isti smjer.



Slika 4.7. Histogram smjera strujanja plimne struje, sa naznačenih geografskim stranama svijeta

Moguće je zaključiti da se plimna struja veliku većinu vremena kreće paralelno sa smjerom protezanja kanala, što potvrđuje vjerodostojnost preuzetih podataka.

4.4. Iskoristivost i dostupnost pojedine turbine

Kako bismo prikazali krivulje snage odabranih turbina, potrebno je izračunati njihove koeficijente iskoristivosti. Koeficijenti iskoristivosti se mogu izračunati pomoću podataka iz Tablice 4.1. i relacije (2-1), s time da na mjernom mjestu nisu dostupni podaci za gustoću vode, pa je pretpostavljena vrijednost idealne gustoće vode od 1000 kg/m³.

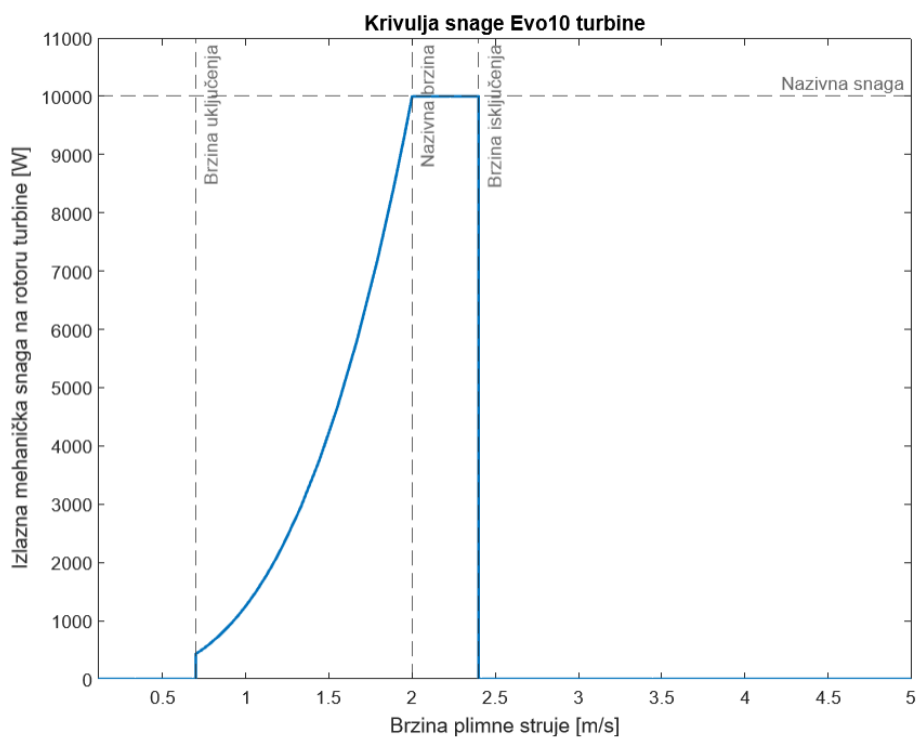
Koeficijenti iskoristivosti turbina poprimaju sljedeće vrijednosti:

$$C_{p_{Ev010}} = \frac{P_{r_1}}{\frac{1}{2} \rho A v_{r_1}^3} = 0,4167 \quad (4-3)$$

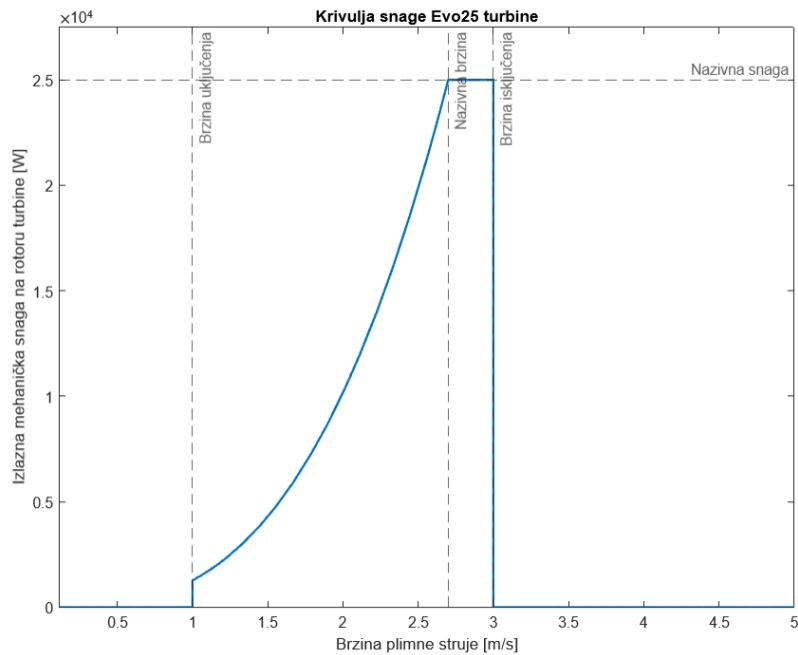
$$C_{p_{Evo25}} = \frac{P_{r_2}}{\frac{1}{2}\rho A v_{r_2}^3} = 0,4234 \quad (4-4)$$

Gdje su P_{r_1} , v_{r_1} , P_{r_2} , v_{r_2} vrijednosti nazivnih snaga i brzina pri kojima se postižu nazivne snage, preuzete iz Tablice 4.1.

Sa dobivenim koeficijentima iskoristivosti turbina, poznavanjem relacije (4-1), te sa poznatim podacima o prijelomnim brzinama iz Tablice 4.1. moguće je prikazati krivulju snage za obje turbine.



Slika 4.8. Krivulja snage Evo10 turbine, sa naznačenom nazivnom snagom i prijelomnim brzinama

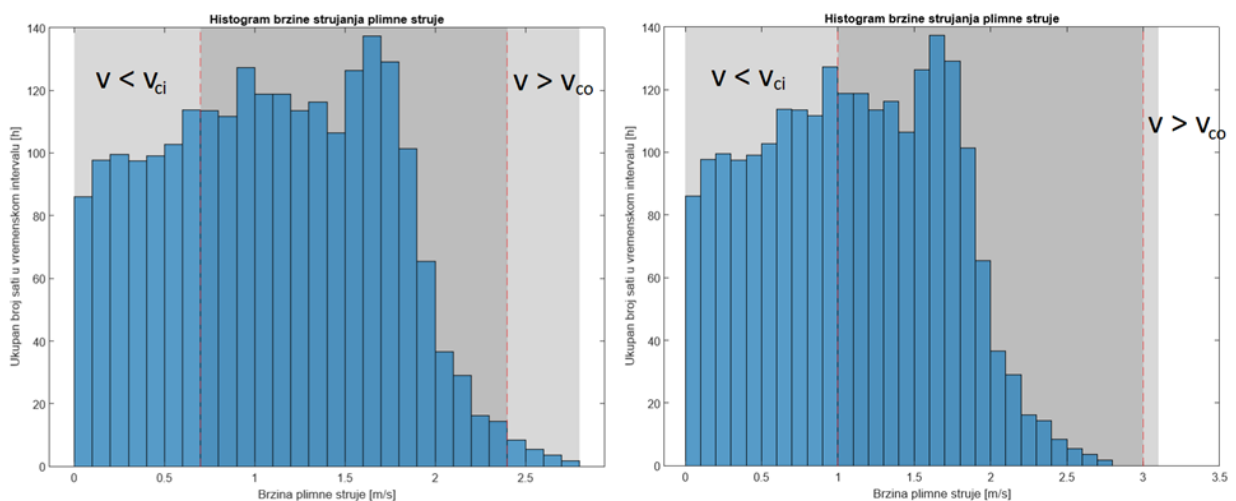


Slika 4.9. Krivulja snage Evo25 turbine, sa naznačenom nazivnom snagom i prijelomnim brzinama

U oba grafa je vidljivo da postoje slučajevi kada se na rotoru turbine neće pojavljivati mehanička snaga, to jest rasponi brzine u kojima se neće proizvoditi električna energija. Slučajevi u kojima se to događa su vidljivi u relaciji (4-1). Slučajevi su sljedeći:

1. Brzina strujanja plimne struje je manja od brzine uključjenja turbine, $v < v_{ci}$
2. Brzina strujanja plimne struje je veća od brzine isključenja turbine, $v > v_{co}$

Pomoću dvaju uvjeta i histograma brzine plimne struje moguće je odrediti ukupno vrijeme za koje obje turbine neće biti u pogonu.



Slika 4.10. Raspon brzina u kojem turbine Evo10 (lijevo) i Evo25 (desno) neće biti u pogonu

Iz histograma, uz pomoć dvaju navedenih uvjeta, je moguće za obje turbine očitati sljedeće vrijednosti vremena, izraženih u satima:

1. Trajanje nedostupnosti turbine zbog preniskog iznosa brzine morske struje,

$$t_{n1} = t(v < v_{ci}) \quad (4-5)$$

2. Trajanje nedostupnosti turbine zbog previsokog iznosa brzine morske struje,

$$t_{n2} = t(v > v_{co}) \quad (4-6)$$

3. Ukupno trajanje nedostupnosti turbine,

$$t_{n_{uk}} = t_{n1} + t_{n2} \quad (4-7)$$

4. Ukupno trajanje u kojem je turbina dostupna, tj. proizvodi bilo koju izlaznu snagu:

$$t_d = t_{uk} - t_{n_{uk}} \quad (4-8)$$

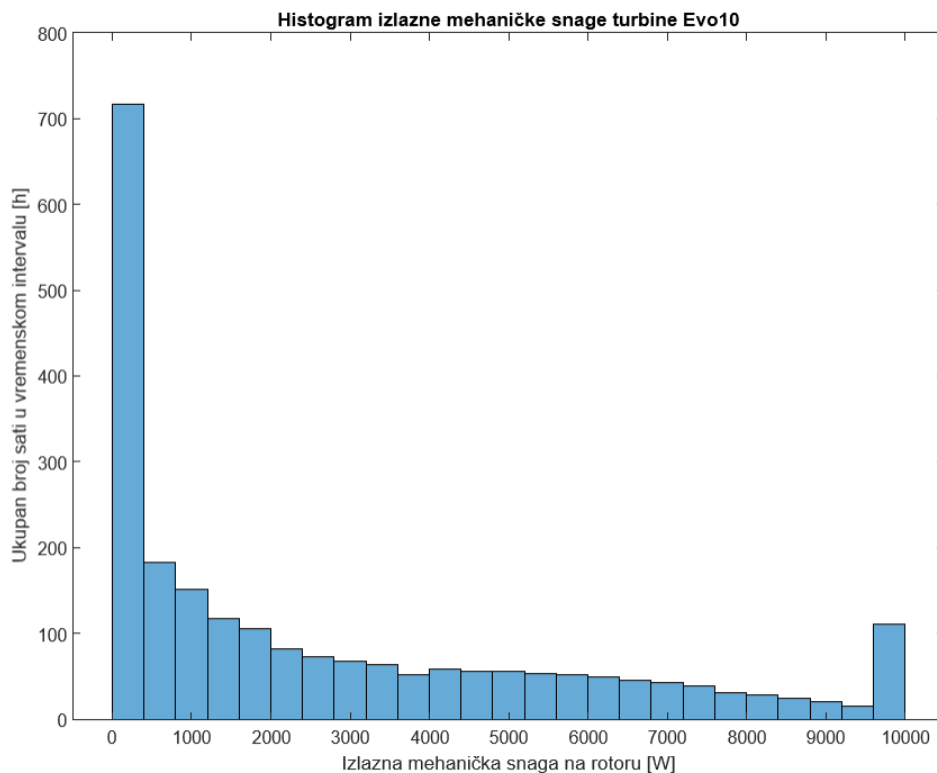
Tablica 4.2. Vrijednosti trajanja dostupnosti i nedostupnosti Evo10 i Evo25 turbina

Turbina	Evo10	Evo25
t_{n1} [h]	695,1	1048,8
t_{n2} [h]	19,5	0
$t_{n_{uk}}$ [h]	714,6	1048,8
t_d [h]	1583,1	1248,9

Pomoću podataka iz tablice je moguće zaključiti da će turbina Evo10 provesti znatno manje vremena van pogona zbog brzine strujanja plimne struje koja je manje od njene brzine uključenja, dok turbina Evo25 neće biti van pogona zbog brzine strujanja plimne struje koja je veća od njene brzine isključenja. Kada se vremena nedostupnosti zbroje i oduzmu od ukupnog vremena iz relacije (4-3), vidljivo je da će turbina Evo10 provesti više vremena u pogonu. Zbog različitih nazivnih snaga i krivulja snage odabranih turbina, potrebno je proračunati koja će turbina proizvesti veći iznos mehaničke snage na rotoru.

4.5. Proračun mehaničke snage na rotoru turbine

Mehanička snaga koju turbina može proizvesti na rotoru najviše ovisi o koeficijentu iskoristivosti same turbine, ali i o rasponu brzina strujanja plimne struje. Pošto su nam koeficijenti iskoristivosti odabranih turbina poznati, te su također poznati iznosi vremena u kojima turbina zbog razlikovanja brzina neće biti u pogonu, moguće je prikazati histogram mehaničke snage na rotoru turbine za obje odabrane turbine. Histogram se konstruira tako da se svaki mjerni uzorak iz preuzete datoteke s podacima uvrsti u relaciju (4-1) te se, ovisno o vrijednosti brzine strujanja plimne struje koju uzorak posjeduje, snaga pojedinog uzorka proračuna te smjesti u histogram. Pošto mjerni uzorak zapravo predstavlja vrijeme trajanja od 6 minuta, skaliranjem pomoću relacija (4-2) i (4-3) se može odrediti ukupno vrijeme u satima za koje se određeni iznos mehaničke snage pojavljuje.

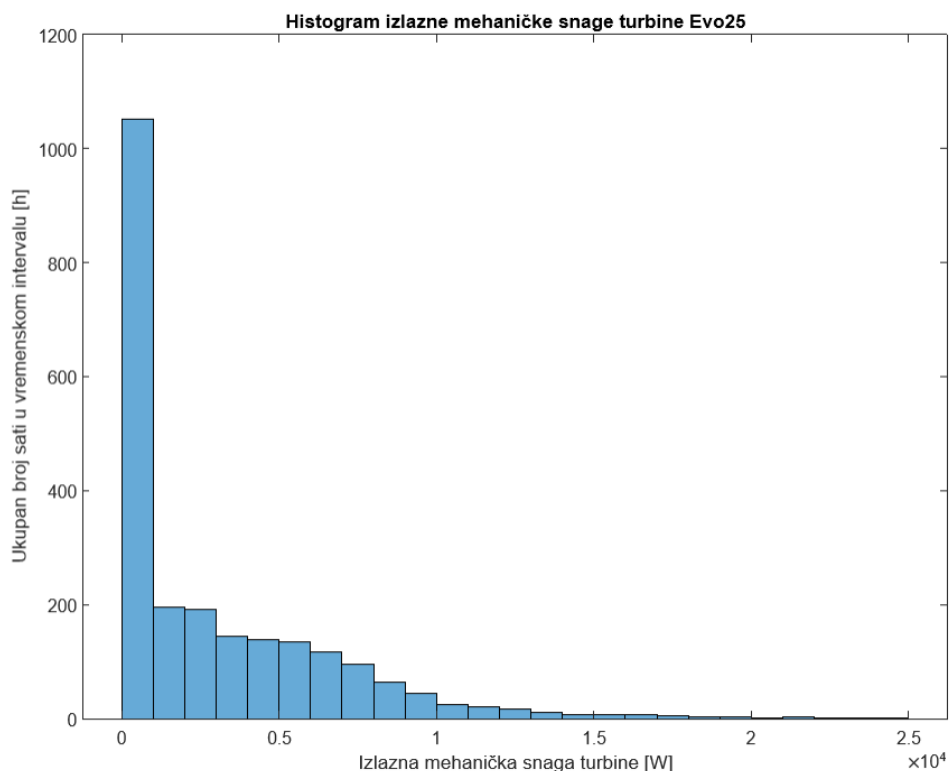


Slika 4.11. Histogram izlazne mehaničke snage turbine Evo10

Moguće je zaključiti da se iznosi vremena nedostupnosti Evo10 turbine poklapaju sa proračunatim vrijednostima u Tablici 4.2. U histogramu su vremena nedostupnosti prikazana zajedno, jer je funkcija krivulje snage turbine jednaka nuli u oba slučaja nedostupnosti. Kada je turbina u pogonu, moguće je izračunati iznos vremena u kojemu je izlazna mehanička snaga jednaka nazivnoj snazi turbine, što ovisi u broju mjernih uzoraka brzine plimne struje koji se nalaze između nazivne brzine i brzine isključenja. Za turbinu Evo10 Trajanje dostupnosti nazivne snage u intervalu iznosi:

$$t_{i_1} = t(P = P_{r_1}) = t(v_{r_1} \leq v < v_{co_1}) = 95,5 \text{ h} \quad (4-9)$$

Na isti način se mogu proračunati izlazna mehanička snaga na rotoru i ukupno vrijeme pri kojem Evo25 turbina posjeduje nazivnu snagu.



Slika 4.12. Histogram izlazne mehaničke snage turbine Evo25

Osim većeg vremena nedostupnosti, Evo25 turbina, iako ima veću nazivnu snagu od Evo10 turbine, znatno manje vremena proizvodi nazivnu snagu na rotoru. Razlog tome su premale brzine strujanja plimnih struja, zbog kojih turbina ne može često doseći nazivnu snagu.

Trajanje dostupnosti nazivne snage u intervalu na rotoru Evo25 turbine iznosi:

$$t_{i_2} = t(P = P_{r_2}) = t(v_{r_2} \leq v < v_{co_2}) = 1,9 \text{ h} \quad (4-20)$$

4.5.1. Mehanički gubici na zupčanicima i ležajevima

Osim gubitaka zbog koeficijenta iskoristivosti turbine, pri pretvorbi energije morskih (ili plimnih) struja u električnu energiju potrebno je uvažiti gubitke, to jest stupnjeve djelovanja ostalih dijelova turbogeneratora i elektrane. Nakon prelaska mehaničke energije sa turbine preko rotora na generator, određena količina energije se gubi na pokretnim i rotirajućim dijelovima.

Među pokretne i rotirajuće dijelove spadaju zupčanici i ležajevi. Gubici na zupčanicima i ležajevima se mogu dogoditi zbog trenja između zupčanka i ležaja, gdje se toplinska energija oslobađa u okolinu, neusklađenosti zupčanika, prevelikog pritiska pri djelovanju kinetičke energije plimnih struja na turbinu i sl.

Prema [33], za H-Darrieusovu turbinu s ravnim oštricama moguće je usvojiti određenu očekivanu vrijednost stupnja djelovanja zupčanika i ležajeva te generatora, čiji su iznosi ključni pri proračunu količine električne energije iz energije plimnih struja. Također je prema [42] moguće usvojiti očekivanu vrijednost stupnja djelovanja energetskog pretvarača kod turbina.

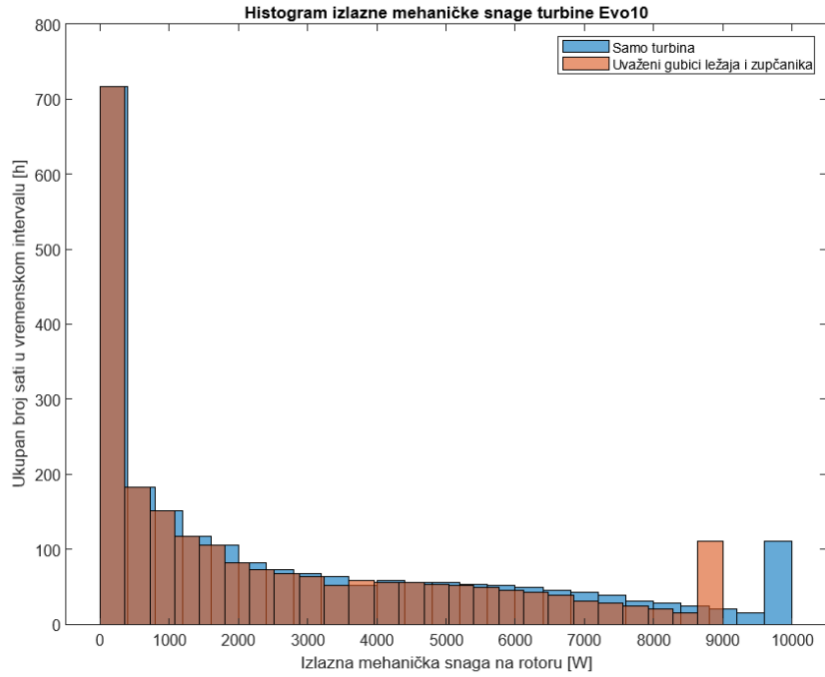
Tablica 4.3. Očekivane vrijednosti stupnjeva djelovanja ostalih dijelova elektrane

Koeficijent	Očekivana vrijednost
Stupanj djelovanja zupčanika i ležaja η_{zl}	0,9
Stupanj djelovanja generatora η_{gen}	0,875
Stupanj djelovanja energetskog pretvarača η_{ep}	0,973

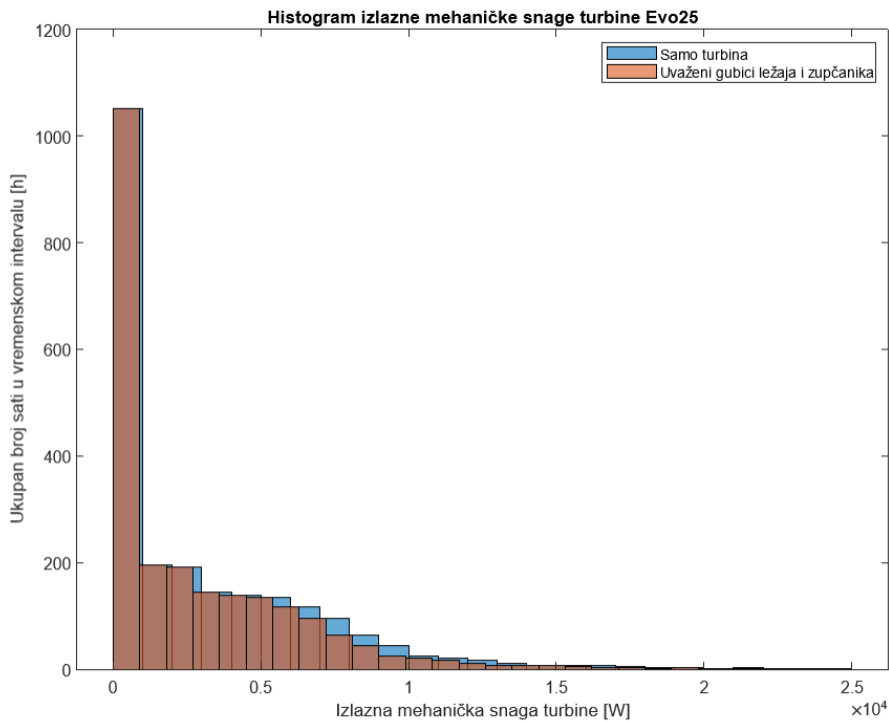
Izraz za krivulju snage je moguće proširiti na sljedeći način:

$$P_t = \begin{cases} 0, & 0 \leq v < v_{ci} \\ \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p \eta_{zl} \eta_{gen} \eta_{ep}, & v_{ci} \leq v < v_r \\ P_r \eta_{zl} \eta_{gen} \eta_{ep}, & v_r \leq v < v_{co} \\ 0, & v \geq v_{co} \end{cases} \quad (4-31)$$

Bitno je naglasiti da će raspon brzina u kojem turbina proizvodi nazivnu snagu također biti obuhvaćen gubicima ostalih dijelova elektrane. Kako bi se mogao vidjeti utjecaj gubitaka zbog zupčanika i ležajeva, potrebno je usporediti histograme mehaničke snage na turbini sa zanemarenim i uvaženim gubicima zbog zupčanika i ležajeva.



Slika 4.13. Histogram izlazne mehaničke snage turbine Evo10 sa uvaženim η_{zl}

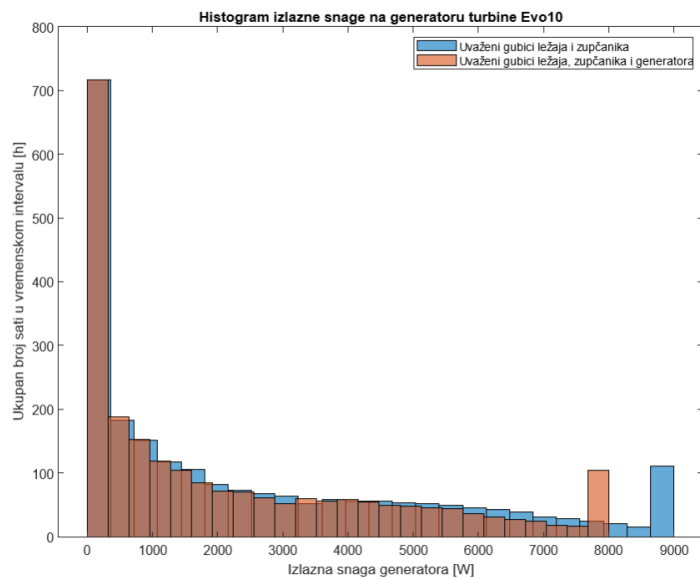


Slika 4.14. Histogram izlazne mehaničke snage turbine Evo25 sa uvaženim η_{zl}

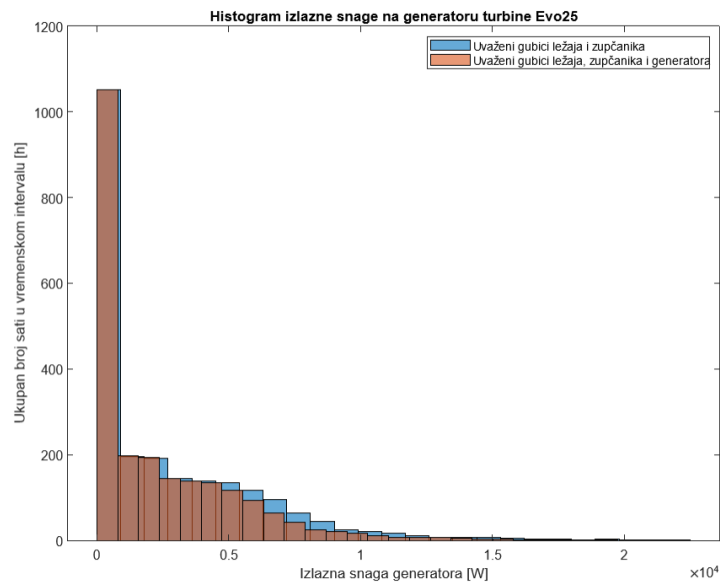
Moguće je zaključiti da će se na izlazima turbina proizvoditi 10% manje mehaničke snage zbog koeficijenta efikasnosti zupčanika i ležaja, jer je iznost koeficijenta vremenski konstantan.

4.6. Gubici generatora

Nakon uvažavanja gubitaka ležajeva i zupčanika, potrebno je uvažiti gubitke generatora, koji iz mehaničke energije koja sa rotora turbine dolazi na nj proizvodi električnu energiju. Gubici kod generatora se mogu pojaviti u obliku gubitaka zbog električnog otpora, gubitaka u jezgri, gubitaka u namotima i sl. Ponovno možemo utjecaj gubitaka na obje turbine prikazati pomoću histograma. Također je moguće izračunati iznos električne energije koju generator proizvede u odabranom vremenskom rasponu, ali će prije toga biti uvaženi gubici energetskog pretvarača.



Slika 4.15. Histogram izlazne snage na generatoru turbine Evo10 sa uvaženim η_{zl} , η_{gen}

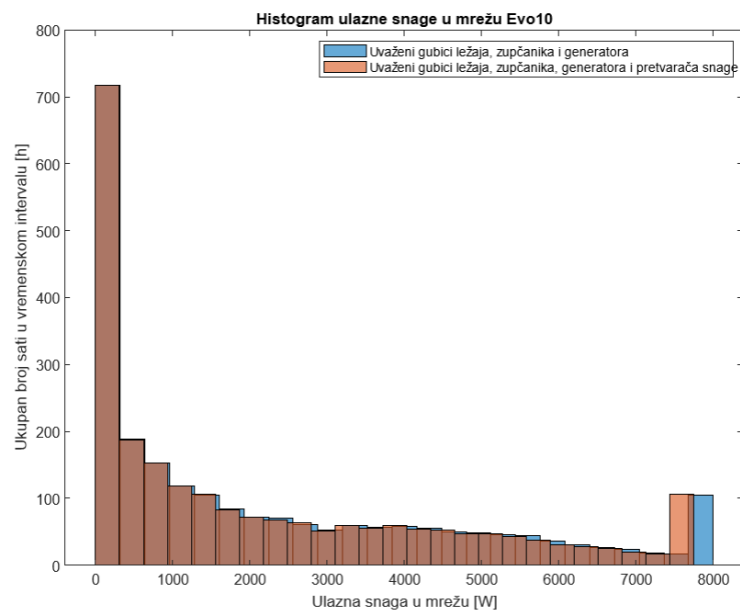


Slika 4.16. Histogram izlazne snage na generatoru turbine Evo25 sa uvaženim η_{zl} , η_{gen}

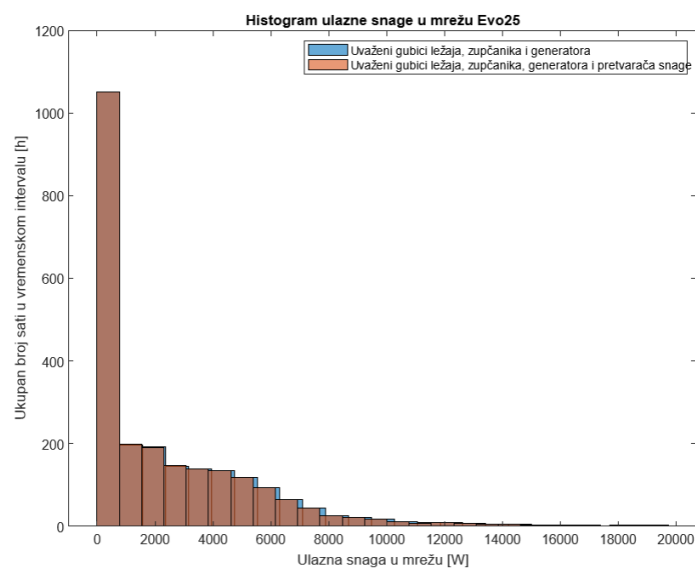
Pošto je stupanj djelovanja generatora konstantan, neovisno o promjeni vremena i brzinama plimne struje, koeficijent zapravo smanjuje iznos snage svakog mjernog uzorka za 12,5%.

4.6.1. Gubici energetskog pretvarača, ukupna električna energija

Nakon uvaženih gubitaka generatora, potrebno je uvažiti gubitke energetskog pretvarača. Pretvarač omogućuje generatoru puštanje snage u mrežu po specifičnim zahtjevima mreže, kao što su potražnja za električnom energijom, raznina napona i sl. Gubici pretvarača snage se mogu pojaviti zbog poluvodičkih komponenti pretvarača, sklopnih gubitaka i sl. Ponovno možemo utjecaj gubitaka obje turbine prikazati pomoću histograma.



Slika 4.17. Histogram ulazne snage u mrežu turbine Evo10 sa uvaženim η_{zl} , η_{gen} , η_{ps}



Slika 4.18. Histogram ulazne snage u mrežu turbine Evo25 sa uvaženim η_{zl} , η_{gen} , η_{ps}

Moguće je zaključiti da konstantni iznos stupnja djelovanja energetskog pretvarača zapravo smanjuje ukupnu proizvedenu snagu na generatoru za 2,7% .

Nakon uvažavanja gubitaka koji se događaju pri pretvorbi kinetičke energije plimnih struja u električnu energiju, moguće je izračunati ukupnu električnu energiju proizvedenu u dostupnom vremenu za obje turbine. Pošto smo brzinu plimne struje unutar vremenskog razmaka mjerenja Δt smatrali konstantnom, smatrat ćemo i snagu, jer predstavlja funkciju brzine plimne struje. Količina proizvedene električne energije za jedan uzorak mjerenja se tada može izračunati pomoću sljedeće relacije

$$E_i = P_{t_i} \Delta t \quad (4-12)$$

Gdje E_i predstavlja količinu proizvedene električne energije u jednom uzorku mjerenja Δt , čije trajanje iznosi 6 minuta, te P_{t_i} predstavlja izlaznu snagu elektrane za jedan uzorak mjerenja, dobivenu pomoću relacije (4-12). Kako bismo izračunali ukupni iznos proizvedene električne energije u ukupnom vremenu promatranja, potrebno je zbrojiti količinu proizvedene električne energije za sve uzorke mjerenja.

$$E = \sum_{i=1}^{n_{uz}} (P_{t_i} \Delta t) \quad (4-13)$$

Pošto je vremenski razmak mjerenja Δt priložen u minutama, te izlazna snaga turbine P_t proračunata u Wattima, ukupni iznos električne energije je prvotno proračunat u Wmin, te ga je zbog preglednosti potrebno pretvoriti u kWh.

Za obje turbine je također moguće izračunati trajanje iskorištenja nazivne snage u intervalu:

$$t_k = \frac{E}{P_r} \quad (4-14)$$

Tablica 4.4. Konačni parametri Evo10 i Evo25 turbina

Turbina	Evo10	Evo25
Trajanje dostupnosti nazivne snage u intervalu t_i [h]	95,5	1,9
Ukupni stupanj djelovanja sustava $C_p \eta_{zl} \eta_{gen} \eta_{ps}$	0,3193	0,3244
Ukupni iznos proizvedene električne energije E [kWh]	4830,6	5197,2

Turbina	Evo10	Evo25
Trajanje dostupnosti bilo koje izlazne snage u intervalu $t_d [h]$	1583,1	1248,9
Trajanje iskorištenja nazivne snage u intervalu $t_k[h]$	483,06	207,89

Moguće je zaključiti da je Evo25 turbina proizvela veću količinu električne energije od Evo10 turbine iako je provela znatno manje vremena u pogonu, te je imala znatno manje trajanje pri kojem je postizala nazivnu snagu, te znatno manje trajanje iskorištenja nazivne snage. Ukupni stupanj djelovanja elektrane u kojoj se nalazi Evo25 turbina je neznatno veći, no i neznatno veći stupanj djelovanja elektrane predstavlja prednost ako uspoređujemo dvije elektrane (ili turbine) sa istim životnim vijekom.

5. ZAKLJUČAK

Elektrane na morske struje predstavljaju jednu od najnovijih vrsta obnovljivih izvora energije, a s time i najmanje istraženu vrstu. Proučavanjem tehnološkog dosega pojedinih metoda pretvaranja kinetičke energije morskih struja u mehaničku, a zatim u električnu energiju dobiven je uvid u pojedine metode koje bi u skoroj budućnosti mogle doseći komercijalni stupanj razvijenosti, gdje je najveći naglasak stavljen na same vrste i podvrste turbina. Proračunom količine električne energije koju turbina, zajedno s ostalim dijelovima elektrane može proizvesti iz kinetičke energije morskih ili plimnih struja daje konkretan primjer osnovnog skupa činjenica i podataka koje je potrebno kontinuirano istraživati kako bi se što brže postigao komercijalni stupanj razvijenosti što većeg broja turbina i tehnologija koje ih prate. Pri istraživanju se naglasak može staviti na različite podatke, kao što su odabir lokacije, odabir turbine, te odabir ostalih dijelova sustava koji zajedno sa turbinom čine elektranu na morske struje.

SAŽETAK

U teorijskom dijelu završnog rada opisani su nastanak i osnovne karakteristike morskih i plimnih struja, njihova uloga u obnovljivim izvorima električne energije, te osnovne razlike naspram ostalih obnovljivih resursa koji se češće koriste za proizvodnju električne energije. Opisani su osnovni načini pretvorbe kinetičke energije morskih struja, gdje je naglasak stavljen na razvijenost pojedinih vrsta turbina, koje na izlazu daju mehaničku energiju. U proračunu su, s obzirom na dostupnost podataka, odabrane dvije vrste turbina, te je izračunata količina električne energije koje turbine mogu proizvesti na proizvoljno odabranoj lokaciji u proizvoljno odabranom vremenskom periodu. U obzir su također uzeti gubici energije ostalih dijelova elektrane na morske struje.

Ključne riječi: elektrana, morske struje, plimne struje, turbina

ABSTRACT

Theoretical part of this undergraduate thesis describes the origin and basic characteristics of marine and tidal currents, as well as their role in renewable sources of energy and fundamental differences compared to other renewable resources that are more commonly used for electricity production. The basic methods of converting the kinetic energy of marine currents are described, with emphasis placed on the development of various types of turbines that generate mechanical energy at the output. In the calculation part of this undergraduate thesis, considering the availability of data, two types of turbines were selected, and the amount of electrical energy that the turbines can produce at an arbitrarily chosen location during an arbitrarily chosen time period was calculated. Energy losses from other parts of the marine currents power plant were also taken into account.

Keywords: power plant, marine currents, tidal currents, turbine

LITERATURA

- [1] D. Šljivac i D. Topić, *Obnovljivi izvori električne energije*, Osijek: Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, 2018.
- [2] Grupa autora, *Fundamentals of physical geography Textbook for class XI*, New Delhi: National Council of Educational Research and Training, 2006.
- [3] Grupa autora, *IRENA Innovation Outlook: Ocean energy technologies*, Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2020.
- [4] Elsevier Inc., *Renewable Energy Focus Handbook*, Oxford: Academic Press, 2009.
- [5] Ocean Energy Council, »Ocean current energy,« [Mrežno]. Available: <https://www.oceanenergycouncil.com/ocean-energy/ocean-current-energy>. [Pokušaj pristupa 13. 6. 2023.].
- [6] National Oceanic and Atmospheric Association, »Tidal Currents 1,« [Mrežno]. Available: https://oceanservice.noaa.gov/education/tutorial_currents/02tidal1.html. [Pokušaj pristupa 13. 6. 2023.].
- [7] National Oceanic and Atmospheric Association, »Tides and Water Levels,« [Mrežno]. Available: https://oceanservice.noaa.gov/education/tutorial_tides/tides05_lunarday.html. [Pokušaj pristupa 13. 6. 2023.].
- [8] J. Epler, B. L. Polagye i J. Thomson, »Limits to the predictability of tidal current energy,« u *OCEANS 2010 MTS/IEEE SEATTLE*, Seattle, 2010.
- [9] S. Gibbons, »Gone with the wind: Valuing the visual impacts of wind turbines through house prices,« *Journal of Environmental Economics and Management*, svez. 72, pp. 177-196, 2015.
- [10] R. Chiabrando, E. Fabrizio i G. Garnerio, »The territorial and landscape impacts of photovoltaic systems: Definition of impacts and assessment of the glare risk,« *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, svez. 13, br. 9, pp. 2441-2451, Prosinac 2009.
- [11] The Engineering ToolBox, »Air – Density, Specific Weight and Thermal Expansion Coefficient,« [Mrežno]. Available: https://www.engineeringtoolbox.com/air-density-specific-weight-d_600.html. [Pokušaj pristupa 13. 6. 2023.].
- [12] The Engineering ToolBox, »Water – Density, Specific Weight and Thermal Expansion Coefficients,« [Mrežno]. Available: https://www.engineeringtoolbox.com/water-density-specific-weight-d_595.html. [Pokušaj pristupa 13. 6. 2023.].
- [13] M. Ishak Yuce i A. Muratoglu, »Hydrokinetic energy conversion systems: A technology status review,« *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, svez. 43(C), pp. 72-82, 2015.
- [14] Crane Engineering, »What are Newtonian and non-Newtonian fluids?,« [Mrežno]. Available: <https://blog.craneengineering.net/what-are-newtonian-and-non-newtonian-fluids>. [Pokušaj pristupa 13. 6. 2023.].
- [15] A. Boretti, »State-of-the-art of MW-level capacity oceanic current turbines,« *Nonlinear Engineering*, svez. 9, br. 1, pp. 361-369, 2020.

- [16] G. Saini i R. P. Saini, »A review on technology, configurations and performance of cross-flow hydrokinetic turbines,« *International Journal of Energy Research*, svez. 43, br. 13, pp. 6639-6679, 2019.
- [17] M. N. Zadeh, M. Pourfallah i S. S. Sabet, »Performance assesment and optimization of a helical savonius wind turbine by modifying the Bach's section,« *SN Applied Sciences*, svez. 3, br. 8, p. 739, 2021.
- [18] D. Magagna i A. Uihlein, »Ocean energy development in Europe: Current status and future perspectives,« *International Journal of Marine Energy*, svez. 11, pp. 84-104, 2015.
- [19] Sustainable Alternative Engineering, »SAE Renewables - Tidal Stream,« [Mrežno]. Available: <https://saerenewables.com/tidal-stream/>. [Pokušaj pristupa 13. 6. 2023.].
- [20] R. Alipour, R. Alipour, S. S. Rahimian Koloor, M. Petru i S. A. Ghazanfari, »On the Performance of Small-Scale Horizontal Axis Tidal Current Turbines. Part 1: One Single Turbine,« *Sustainability*, svez. 12, br. 15, p. 5985, Srpanj 2020.
- [21] A. N. Gorban, A. M. Gorlov i V. M. Silantyev, »Limits of the Turbine Efficiency for Free Fluid Flow,« *Journal of Energy Resources Technology*, svez. 123, br. 4, pp. 311-317, 2001.
- [22] C. Fleming i R. Willen, »Analysis of bi-directional ducted tidal turbine performance,« *International Journal of Marine Energy*, svez. 16, 2016.
- [23] J. M. Laurens, M. Tarfaoui i M. Ait-Mohammed, »Numerical Investigation of Bare and Ducted Horizontal Axis Marine Current Turbines,« u *International Conference on Ocean Energy*, Halifax, 2015.
- [24] B. Huang, G. J. Zhu i T. Kanemoto, »Design and performance enhancement of a bi-directional counter-rotating type horizontal axis tidal turbine,« *Ocean Engineering*, svez. 128, pp. 116-123, 2016.
- [25] Power Technology, »SeaGen Turbine, Northern Ireland, UK,« [Mrežno]. Available: <https://www.power-technology.com/projects/strangford-lough/>. [Pokušaj pristupa 20 7 2023].
- [26] SIMEC Atlantis Energy Renewables, »AR1500 Tidal Turbine,« [Mrežno]. Available: <https://www.atlantisresourcesltd.com/wp/wp-content/uploads/2016/08/AR1500-Brochure-Final-1.pdf>. [Pokušaj pristupa 24. Srpanj 2023.].
- [27] SIMEC Atlantis Energy Renewables, »Meygen,« [Mrežno]. Available: <https://saerenewables.com/tidal-stream/meygen/>. [Pokušaj pristupa 24. Srpanj 2023.].
- [28] Vlada Ujedinjenog Kraljevstva, »Contracts for Difference,« [Mrežno]. Available: <https://www.gov.uk/government/publications/contracts-for-difference-cfd-allocation-round-4-results/contracts-for-difference-cfd-allocation-round-4-results-accessible-webpage>. [Pokušaj pristupa 24. Srpanj 2023.].
- [29] Orbital Marine Power, »The most powerful tidal turbine in the world,« [Mrežno]. Available: <https://www.orbitalmarine.com/o2/>. [Pokušaj pristupa 24. Srpanj 2023.].
- [30] European Marine Energy Centre, »OpenHydro,« [Mrežno]. Available: <https://www.emec.org.uk/about-us/our-tidal-clients/open-hydro/>. [Pokušaj pristupa 24. Srpanj 2023.].
- [31] F. Behrouzi, M. Nakisa, A. Maimun i M. A. Yasser, »Global renewable energy and its potential in Malaysia: A review of Hydrokinetic turbine technology,« *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, svez. 62, pp. 1270-1281, Rujan 2016.
- [32] M. T. Nguyen, F. Balduzzi i A. Goude, »Effect of pitch angle on power and hydrodynamics of a vertical axis turbine,« *Ocean Engineering*, svez. 238, Listopad 2021.

- [33] M. J. Khan, M. T. Iqbal i J. E. Quaicoe, »Design Considerations of a Straight Bladed Darrieus Rotor for River Current Turbines,« u *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Montreal, 2006.
- [34] R. Alipour, R. Alipour, F. Fardian, S. S. Rahimian Kolor i M. Petru, »Performance improvement of a new proposed Savonius hydrokinetic turbine: a numerical investigation,« *Energy Reports*, svez. 6, Studeni 2020.
- [35] F. Guo, B. Song, Z. Mao i W. Tian, »Experimental and numerical validation of the influence on Savonius turbine caused by rear deflector,« *Energy*, svez. 196, Travanj 2020.
- [36] Instream Energy Systems, »Projects,« [Mrežno]. Available: <https://www.instreamenergy.com/projects>. [Pokušaj pristupa 26. Srpanj 2023.].
- [37] HydroQuest, »OceanQuest,« [Mrežno]. Available: <https://www.hydroquest.fr/en/oceanquest-en/>. [Pokušaj pristupa 26. Srpanj 2023.].
- [38] Hydrokinetic Power Generation Systems, »Cost effective hydrokinetic turbines,« [Mrežno]. Available: <https://www.hpgs.eu/>. [Pokušaj pristupa 26. Srpanj 2023.].
- [39] Hydrokinetic Power Generation Systems, »Products,« [Mrežno]. Available: <https://www.hpgs.eu/products>. [Pokušaj pristupa 26. Srpanj 2023.].
- [40] Atlantis Resources, »SeaGen-S 2 MW,« [Mrežno]. Available: <https://atlantisresourcesltd.com/wp/wp-content/uploads/2016/08/SeaGen-Brochure.pdf>. [Pokušaj pristupa 26. Srpanj 2023.].
- [41] National Oceanic and Atmospheric Organisation, »Tides & Currents - Matagorda Entrance Channel data,« [Mrežno]. Available: <https://tidesandcurrents.noaa.gov/cdata/DataPlot?id=mg0201>. [Pokušaj pristupa 26. Srpanj 2023.].
- [42] N. Maslov, J. Charpentier i C. Claramunt, »A modelling approach for a cost-based evaluation of the energy produced by a marine energy farm,« *International Journal of Marine Energy*, svez. 9, pp. 1-19, 2015.

ŽIVOTOPIS

Tomislav Rimac rođen je 25. kolovoza 2001. u Vinkovcima. U istom gradu završava osnovnu školu Bartola Kašića, te 2016. godine upisuje Tehničku školu Ruđera Boškovića u Vinkovcima. Godine 2020. ostvaruje upis na Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, smjer elektrotehnika.