

# Tehno-ekonomska analiza hibridnog postrojenja reverzibilne hidroelektrane, plutajuće fotonaponske elektrane i desalinizacijskog postrojenja na otoku

---

Rajlić, Ven

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:386509>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-20**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Ven Rajlić**

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Goran Krajačić, dipl. ing.

Student:

Ven Rajlić

Zagreb, 2023.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svome mentoru izv. prof. dr. sc. Goranu Krajačiću na pomoći, strpljenju i ustupljenom vremenu i znanju tijekom izrade završnog rada.

Zahvaljujem se asistentu Goranu Stunjeku na pruženoj pomoći, savjetima i prenesenom znanju tijekom izrade završnog rada.

Zahvaljujem se projektu INSULAE financiran iz programa Obzor 2020 i projektu OESKEP financiran iz Europskog fonda za regionalni razvoj za ustupljene podatke.

Posebno bih želio zahvaliti svojoj obitelji koja mi je omogućila obrazovanje na preddiplomskom studiju i pružala podršku tijekom istog.

Ven Rajlić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
Procesno-energetski, konstrukcijski, inženjersko modeliranje i računalne simulacije i brodostrojarski

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 23 – 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 23 -	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Ven Rajlić** JMBAG: **0035215398**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Tehno-ekonomska analiza hibridnog postrojenja reverzibilne hidroelektrane, plutajuće fotonaponske elektrane i desalinizacijskog postrojenja na otoku**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Techno-economic analysis of a hybrid pumped hydro-floating solar-desalination unit system on the island basis**

Opis zadatka:

Mnogi se otoci danas suočavaju s kritičnim nedostatkom pitke vode za lokalno stanovništvo i turiste. S ciljem izbjegavanja skupog uvoza pitke vode s kopna, otoci se moraju sve više oslanjati na sustav desalinizacije, koji koristi električnu energiju proizvedenu iz uvezenih fosilnih goriva, a koja povećavaju trošak tehnologije i emitiraju štetne plinove u atmosferu. To otvara mogućnost veće primjene obnovljivih izvora energije za desalinizaciju vode, primarno bazirano na energiji vjetra, Sunca i hidropotencijala. Skladištenje energije u reverzibilnim hidroelektranama je dobro uohodana i komercijalno prihvatljiva tehnologija za skladištenje energije te se koristi još od 1890-ih godina. Hidroenergija nije samo obnovljiv i održiv izvor energije, već njezina fleksibilnost i kapacitet skladištenja također omogućavaju poboljšanje stabilnosti električne mreže i potporu primjeni drugih varijabilnih obnovljivih izvora energije poput vjetra i sunca. Plutajući solarni fotonaponski sustavi primjer su novijeg i sve održivijeg korištenja fotonaponskih sustava pri kojim se sustavi postavljaju izravno na vodene površine. Predviđeni rast korištenja plutajućih fotonaponskih sustava predstavlja značajnu korist sektoru proizvodnje energije iz hidroelektrana s obzirom na sinergiju između dviju tehnologija. U okviru završnog rada potrebno je analizirati hibridnu primjenu tri predstavljene tehnologije na primjeru jednog otoka te izraditi jednostavnu tehno-ekonomsku analizu promatranog hibridnog sustava.

U okviru završnog zadatka potrebno je:

1. Napraviti pregled literature na temu korištenja tehnologije reverzibilnih hidroelektrana, plutajućih solarnih elektrana i primjene tehnologije desalinizacije,
2. Napraviti pregled literature na temu prednosti i mana hibridizacije sustava na otočnoj razini te prikazati realizirane sustave na globalnoj razini koji uključuju proces desalinizacije i korištenje hidroelektrana u kombinaciji sa plutajućim fotonaponskim sustavima,
3. Napraviti jednostavnu tehno-ekonomsku analizu korištenja hibridnog sustava temeljen na predloženim tehnologijama kako bi se zadovoljile potrebe za energijom i pitkom vodom odabranog otoka.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć

Zadatak zadan:

30. 11. 2022.

Datum predaje rada:

1. rok: 20. 2. 2023.  
2. rok (izvanredni): 10. 7. 2023.  
3. rok: 18. 9. 2023.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 27. 2. – 3. 3. 2023.  
2. rok (izvanredni): 14. 7. 2023.  
3. rok: 25. 9. – 29. 9. 2023.

Zadatak zadao:

Izv. prof. dr. sc. Goran Krajačić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	II
POPIS GRAFOVA .....	III
POPIS TABLICA .....	IV
SAŽETAK .....	V
SUMMARY .....	VI
1. UVOD .....	1
2. DESALINIZACIJA .....	3
2.1. Podjela desalinizacijskih sustava .....	4
2.1.1. Sustav reverzibilne osmoze .....	5
2.1.2. Ostali sustavi .....	6
2.1.2.1. MSF sustav .....	6
2.1.2.2. ED sustav .....	7
2.1.2.3. HDH sustav .....	8
2.1.2.4. MD sustav .....	9
3. SUSTAVI PLUTAJUĆE FOTONAPONSKE ELEKTRANE .....	11
3.1. Vrste i način rada plutajućih fotonaponskih elektrana .....	13
3.2. Prednosti i nedostaci plutajućih fotonaponskih sustava .....	15
3.3. Razvoj i primjena plutajućih fotonaponskih sustava .....	16
4. REVERZIBILNE HIDROELEKTRANE .....	19
4.1. Općenito o hidroelektranama .....	19
4.2. Podjela hidroelektrana .....	20
4.2.1. Akumulacijske HE .....	20
4.2.2. Protočne HE .....	20
4.2.3. Reverzibilne HE .....	21
4.3. Opis, prednosti i mane reverzibilne hidroelektrane .....	22
5. HIBRIDNI SUSTAV REVERZIBILNE OSMOZE, PLUTAJUĆE FORONAPONSKE ELKTRANE I REVERZIBILNE HIDROELEKTRANE .....	26
5.1. Prednosti i mane hibridnog postrojenja .....	26
5.2. Primjena hibridnih sustava .....	27
6. PRIMJENA HIBRIDNOG POSTROJENJA NA OTOKU CRESU .....	30
6.1. Općenito o otoku Cresu .....	30
6.2. Plutajuća fotonaponska elektrana .....	32
6.3. Desalinizacijski sustav .....	34
6.4. Reverzibilna hidroelektrana .....	37
6.5. Financijska i ekonomska analiza .....	38
6.6. Analiza osjetljivosti .....	41
7. ZAKLJUČAK .....	45
LITERATURA .....	46

**POPIS SLIKA**

Slika 2.1 Shematski prikaz RO proces [2].....	6
Slika 2.2 Shematski prikaz MSF procesa [6].....	7
Slika 2.3 Shematski prikaz ED procesa [7] .....	8
Slika 2.4 Shematski prikaz HDH procesa [2] .....	9
Slika 2.5 Shematski prikaz MD procesa [7] .....	10
Slika 3.1 Shematski prikaz FPV postrojenja [10] .....	13
Slika 3.2 Primjer postavljenog FPV sustava iznad vode .....	14
Slika 3.3 Primjer postavljenog FPV sustava na vodi [11] .....	14
Slika 3.4 Primjer postavljenog FPV sustava u vodi [12].....	15
Slika 3.5 Najveći FPV sustav u svijetu, Dezhou u Kini [14].....	17
Slika 3.6 Sustav FPV, Semcorb u Singapuru [18] .....	17
Slika 3.7 Sekdoorn FPV sustav u Nizozemskoj snage 14,5 MW [19].....	18
Slika 4.1 Najveća HE na svijetu, Tri klanca na rijeci Yangtze [20].....	20
Slika 4.2 Primjer protočne HE .....	21
Slika 4.3 Primjer RHE [21].....	22
Slika 4.4 Shematski prikaz RHE [22].....	23
Slika 4.5 Najveća RHE u svijetu, provincija Hebei u Kini [23] .....	25
Slika 4.6 Najveća RHE u Europi smještena na rijeci Jucar u Španjolskoj [24].....	25
Slika 5.1 Prvo ikad FPV/RHE postrojenje, Montalegru u Portugalu [26].....	28
Slika 5.2 Najveći FPV/HE sustav u svijetu, Tajland [28] .....	29
Slika 5.3 FPV/RHE sustav Alqueva, Portugal [29].....	29
Slika 6.1 Arhipelag Cres-Lošinj [31] .....	31
Slika 6.2 Lokacija gornjeg akumulacijskog jezera.....	32
Slika 6.3 Lokacija RO sustava .....	35

---

**POPIS GRAFOVA**

Graf 2.1 Udio desalinizacijskih sustava u ukupnoj proizvodnji vode [5] .....	5
Graf 3.1 Proizvodnja energije iz fotonaponskih elektrana [6] .....	12
Graf 3.2 Usporedba proizvedene el. energije iz različitih izvora u Republici Hrvatskoj [9] ...	12
Graf 4.1 Usporedba ukupne proizvodnje energije iz OIE [1] .....	19
Graf 5.1 Usporedba rada HE prije i poslije ugradnje PV sustava i rad ukupnog sustava [26] .	27
Graf 6.1 Usporedba 8 različitih nagiba .....	33
Graf 6.2 Potencijalno proizvedena energija u svakom mjesecu za nagib od 36° .....	33
Graf 6.3 Usporedba potražene i proizvedene količine vode .....	36
Graf 6.4 Usporedba sadašnje vrijednosti novca i kumulativnog tijeka sadašnje vrijednosti novca .....	41
Graf 6.5 Promjena IRR-a i NPV-a u ovisnosti o dnevnoj tarifi el. energije .....	42
Graf 6.6 Promjena IRR-a i NPV-a u ovisnosti o cijeni vode .....	42
Graf 6.7 Promjena IRR-a i NPV-a u ovisnosti o noćnoj tarifi el. energije .....	43
Graf 6.8 Promjena IRR-a i NPV-a u ovisnosti o snazi FPV-a .....	44
Graf 6.9 Usporedba minimalne potrebne dnevne cijene električne energije za različite snage FPV sustava .....	44



---

**POPIS TABLICA**

Tablica 2.1 Ovisnost kakvoće vode o broju otopljenih tvari .....	3
Tablica 2.2 TDS u raznim morima i oceanima [4].....	4
Tablica 3.1 Prednosti i mane FPV sustava .....	15
Tablica 6.1 Troškovi FPV sustava .....	34
Tablica 6.2 Troškovi RO sustava .....	35
Tablica 6.3 Troškovi RHE sustava.....	38
Tablica 6.4 Dvotarifni model cijena el. energije .....	39
Tablica 6.5 Sve stavke potrebne za računanje ekonomskog i financijskog toka novca .....	39

**SAŽETAK**

U ovome je radu cilj prikazati i objasniti jednostavnu tehno-ekonomsku analizu hibridnog postrojenja plutajuće fotonaponske elektrane, sustava desalinizacije i reverzibilne hidroelektrane. Rijetko koji otok danas ima dovoljne izvore pitke vode koji bi zadovoljili potrebe stanovništva, a pogotovo je značajan dodatni utjecaj povišene potrošnje resursa zbog turističke sezone. U cilju rješavanja ovog problema, razmatran je sustav desalinizacije koji bi zamijenio dosadašnje uvoze pitke vode njenom proizvodnjom, a na otocima koji imaju vlastite izvore pitke vode, desalinizacijsko postrojenje doprinosi dodatnoj sigurnosti od prekomjernog iskorištavanja dostupnih izvora. Potrebna energija za proces desalinizacije osiguravala bi se iz sunčeve energije posredstvom plutajuće fotonaponske elektrane koja se kao tehnologija ubrzano razvija i sve više dobiva na značaju. Sustav reverzibilne hidroelektrane se u okviru ovog zadatka razmatrao kao zasebni sustav zbog pojednostavljenja tehno-ekonomske analize iako se u stvarnosti mora razmatrati kao zajednički sustav koji može pružiti dodatnu fleksibilnost. Kao najpogodniji otok za primjenu tri promatrana sustava odabran je otok Cres. Zbog svojeg prirodnog izvora vode, Vranskog jezera, kojim se opskrbljuje cijeli arhipelag Cres-Lošinj, promatran je slučaj nadopunjavanja jezera desaliniziranom vodom kako bi se spriječilo prekomjerno crpljenje u budućnosti i mogući rizik zaslanjivanja jedinog izvora pitke vode na promatranom arhipelagu. Vransko je jezero, zbog svog geografskog položaja i velike površine, idealno za postavljanje plutajuće fotonaponske elektrane te će također, u ovome radu, služiti kao donje akumulacijsko jezero reverzibilne hidroelektrane. Rezultati analize pokazuju isplativost ovog projekta u ekonomskom i u smislu energetskeg razvoja otoka.

Ključne riječi: Desalinizacija, plutajuće solarne elektrane, reverzibilne hidroelektrane, hibridno postrojenje, otok Cres

---

**SUMMARY**

The goal of this work is to present and explain a simple techno-economic analysis of a hybrid plant consisting of a floating photovoltaic power plant, a desalination system and a pumped hydro storage plant. It is rare that an island today has sufficient sources of drinking water to meet the needs of the population, especially the additional impact of increased consumption of the resources due to the tourist season. With the aim of solving this problem, a desalination system was considered, which would replace the current imports of drinking water with its production, and on the islands that have their own sources of drinking water, as a guarantee that there would be no excessive pumping of said sources. The necessary energy for desalination would be provided from the solar energy, by means of a photovoltaic power plant, which as a technology is rapidly developing and gaining more importance. Pumped hydro storage plant was considered as a separate system in this task due to the simplification of the techno-economic analysis, although in reality it must be considered as a joint system that can provide additional flexibility. The island of Cres was chosen as the most suitable island for the application of the three observed systems. Due to its natural source of water in the form of lake Vrana, which supplies the entire Cres-Lošinj archipelago, a case of refilling the lake with desalinated water was observed in order to prevent excessive pumping in the future and the risk of salinization of the only source of drinking water on the observed archipelago. Vrana lake, due to its geographical location and large surface area, is ideal for setting up a floating photovoltaic power plant and will also, in this work, serve as the lower storage lake of a pumped hydro storage plant. The results of the analysis show the profitability of this project in terms of economic and energy development of the island.

Key words: Desalination, floating photovoltaic power plant, pumped hydro storage, hybrid system operation, island Cres

## 1. UVOD

Svjetske potrebe za električnom energijom iz dana u dan rastu i sukladno tome, povećava se broj postrojenja potrebnih za njezinu proizvodnju. Oko 72% električne energije u svijetu je proizvedeno iz neobnovljivih izvora energije [1] kojima pripadaju: nafta, nuklearno gorivo, prirodni plin i ugljen, a odavno je poznata činjenica kako njihova eksploatacija šteti ljudima i planetu Zemlji. Posljedično se, unazad par desetljeća, počelo intenzivno tragati za njihovom alternativom te su otkrivene i razvijane brojne tehnologije koje bi ih zamijenile. Energija se u prirodi krije u mnogim oblicima poput sunčevog zračenja, strujanja zraka, strujanja vode i upravo su ti oblici najviše prepoznati kao novi izvori energije implementirani u obliku fotonaponskih elektrana, vjetroelektrana i hidroelektrana koje koriste, prema imenu, Sunce, vjetar i vodu za dobivanje električne energije.

Provedenim se istraživanjima u bliskoj prošlosti razvila nova tehnologija fotonaponskih elektrana koja se, umjesto ugrađivanjem na „kopnenu“ konstrukciju, postavlja na vodene površine te se prikladno zove plutajuća fotonaponska elektrana. Samim postavljanjem na vodene površine se ostvaruju brojne prednosti ovog sustava koje će u nastavku biti detaljnije objašnjene, no, obzirom da se počeo primjenjivati nedavno, još je uvijek nedovoljno istražen da bi se standardizirao u svijetu. Prema radu se ne razlikuje od uobičajenih fotonaponskih elektrana pa se može zaključiti kako je najveći problem sustava nepredvidljivost u proizvodnji električne energije obzirom na nepoznate uvjete potrebne za rad. Stoga je instalaciju ovakvog postrojenja najpoželjnije ukomponirati sa sustavom koji bi pohranio viškove proizvedene energije te ih koristio kada se ne može proizvesti potrebna količina. Sustavi skladištenja energije se mogu podijeliti u 5 glavnih skupina: pohrana u električnu energiju, pohrana u mehaničku energiju, pohrana u toplinsku energiju, pohrana u elektro-kemijsku energiju i pohrana u potencijalnu energiju. Najzastupljenija tehnologija pohranjivanja energije je reverzibilna hidroelektrana koja skladišti energiju u obliku potencijalne energije vode. Sastoji se od 2 akumulacijska jezera i pomoću viška proizvedene energije se voda pumpa iz donjeg u gornje akumulacijsko jezero pa kada je potrebno, ta se voda dovodi natrag do turbine u donjem jezeru i proizvodi se električna energija. Glavna prednost nad drugim sustavima skladištenja je zbog kapaciteta pohranjene energije. Integriranje sustava fotonaponske elektrane i reverzibilne hidroelektrane u hibridno postrojenje koristilo bi oboma sustavima što će kasnije biti prikazano.

Jednako kao i sa energijom, zahtjevi za pitkom vodom neprestano rastu. Iako se čini kako vode na Zemlji ima dovoljno, velika većina vode nije za konzumaciju, pri tome se misli na slanu vodu. Izvori pitke vode se sve više crpe, a čovječanstvo broji sve više članova te je zbog toga primorano potražiti inovativna rješenja u obliku desalinizacijskih sustava. Takvi sustavi se koriste za odstranjivanje soli i ostalih neželjenih sastojaka iz slane vode čineći ju pitkom. Poseban zahtjev za sustavima za odslanjivanje imaju područja oskudna pitkom vodom, a najviše se ističu otoci. Otok je kopnena površina okružena morskom vodom sa svih strana pa se može zaključiti kako je idealan za postavljanje navedenog sustava s ciljem izbjegavanja uvoza pitke vode. Ipak, desalinizacijski sustavi troše veliku količinu energije potrebnu za svoj rad, od 3-22 kWh/m<sup>3</sup> [2], ovisno o salinitetu morske vode i vrsti sustava. To postavlja dodatan zahtjev prilikom njihove ugradnje, a rješenje se pronalazi u obnovljivim izvorima energije.

Već navedeni plutajući fotonaponski sustav i reverzibilna hidroelektrana se nameću kao prikladna tehnologija na otoku kako bi se izbjegla proizvodnja energije iz neobnovljivih izvora ili skupi uvoz energije potreban za rad desalinizacijskog sustava. Upravo je tema ovog rada realizirati hibridno postrojenje desalinizacijskog sustava, plutajućeg fotonaponskog sustava i reverzibilne hidroelektrane na odabranom otoku i time ga vodno osamostaliti.

## 2. DESALINIZACIJA

Voda je kemijski spoj 2 atoma vodika i jednog atoma kisika ( $H_2O$ ). Život na Zemlji je nemoguć bez potonjeg kemijskog spoja koji kao takav spada u osnovne potrebe svakog živog bića, pa tako i ljudi. Voda prekriva oko 70 % Zemljine površine te se sa sigurnošću može reći kako je ima na pretek. Problem je u tome što neznatno više od 97 % ukupne vode čini morska voda koja je slana i nije pogodna za konzumaciju. Preostalih 3 % nalazi se u obliku leda (2 %) i kopnenih voda (1 %) koje su neravnomjerno raspodijeljene. Porastom ljudske populacije, zahtjevi za pitkom vodom će biti sve veći, a i trenutno je stanje takvo da je nema dovoljno i nije dostupna u svim dijelovima svijeta. Prema Ujedinjenim Narodima, oko 700 milijuna ljudi iz 43 različite zemlje pati od nestašica vode [2]. Upravo radi navedenih podataka se sustavi odslanjivanja (desalinizacije) intenzivno razvijaju kao rješenje koje bi koristilo dostupna mora i oceane za proizvodnju desalinizirane vode te smanjili iskorištavanje mogućih i postojećih izvora pitke vode kako ne bi došlo do nestašica. Desalinizacija je proces odvajanja minerala i soli iz vode, najčešće morske, za dobivanje pitke, tehnološke ili vode za navodnjavanje. Ovaj postupak je često jeftiniji od samog uvoza vode za izolirana i morem odsječena mjesta poput otoka.

Slanoća mora ili vode je jedan od važnijih kriterija za odabir desalinizacijskih sustava, a mjeri se preko ukupnog broja otopljenih tvari (eng. Total dissolved solids - TDS) po litri vode, mg/L. Prema Svjetskoj zdravstvenoj organizaciji voda za piće se može svrstati u 5 kategorija prema Tablica 2.1, iz koje je vidljivo kako se pitkom vodom smatra sva voda koja sadrži manje od 900 mg/L TDS-a [3].

Tablica 2.1 Ovisnost kakvoće vode o broju otopljenih tvari

Kakvoća vode	TDS (mg/L)
Odlična	<300
Dobra	300-600
Dovoljna	600-900
Loša	900-1200
Neprihvatljiva	>1200

Vodu, prema tome, možemo podijeliti na: pitku vodu (<900 mg/L), bočatu vodu (900-10000 mg/L) i slanu vodu (>10000 mg/L) [2]. Radi lakšeg uvida u količinu TDS-a u morima,

prikazana je Tablica 2.2 TDS u raznim morima i oceanima različitih mora i njihovih TDS vrijednosti.

Tablica 2.2 TDS u raznim morima i oceanima [4]

More/ocean	TDS (mg/L)
Baltičko more	7000
Crno more	20000
Atlantski ocean (sjever)	29000
Jadransko more	31400
Tihi ocean	33600
Indijski ocean	33800
Atlantski ocean (jug)	36000
Meditersko more	39000
Crveno more	43000
Perzijski zaljev	50000
Zaljev morskih pasa (Zapadna obala Australije)	70000
Kara-Bogaz-Gol (Istočna obala Kaspijskog jezera)	164000
Mrtvo more	220000

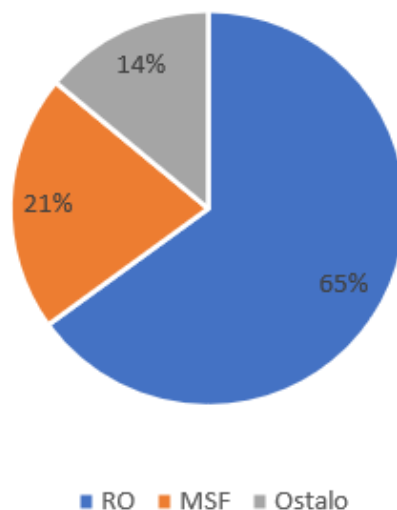
Bitno je naglasiti kako se za potrebe desalinizacijskih sustava ne razmatra proizvedena voda s većim sadržajem od 500 mg/L TDS-a s obzirom da takva voda ima negativne utjecaje na vodoopskrbne sustave zbog korozije [3].

## 2.1. Podjela desalinizacijskih sustava

Sustavi desalinizacije se mogu podijeliti u dvije glavne skupine: membranski sustavi desalinizacije i sustavi desalinizacije toplinskim procesima (fazna promjena stanja vode). Membranski se sustavi temelje na prolasku morske vode kroz, svakom sustavu svojstvenu, membranu i time filtriraju istu, a kod sustava desalinizacije toplinskim procesima se morska voda zagrijava dok ne ispari, te para, koja ne sadrži otopljene tvari, dalje cirkulira do kondenzatora gdje se skuplja destilat. [5]

Neki od važnijih membranskih sustava su: elektrodijaliza (eng. Electrodialysis - ED), ionska izmjena (eng. Capacitive deionization - CDI), membranska destilacija (eng. Membrane distillation - MD) i reverzna osmoza (eng. Reverse osmosis - RO), dok su neki od važnijih sustava desalinizacije toplinskim procesima: metoda ovlaživanja i odvlaživanja zraka (eng.

Humidification dehumidification - HDH), parno-kompresijska destilacija (eng. Vapor compression distillation - VDC) te višestupnjevita destilacija (eng. Multiflash distillation - MSF). Najkorišteniji sustav je RO, zatim slijedi MSF, dok ostali sustavi čine neznatan udio u ukupnom broju desaliniziranih postrojenja u odnosu na navedena 2 sustava. Na Graf 2.1 se može vidjeti udio pojedinog sustava u ukupnoj svjetskoj proizvodnji desalinizirane vode:



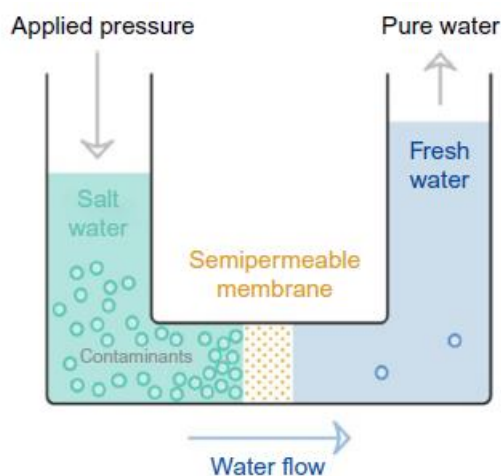
Graf 2.1 Udio desalinizacijskih sustava u ukupnoj proizvodnji vode [5]

Membranski sustavi su jednostavnije izvedbe te ih odlikuje veća iskoristivost i manja potrebna energija za obavljanje svoje zadaće, uklanjanje soli, dok toplinski sustavi proizvode vodu bolje kakvoće. U nastavku će biti opisano nekoliko desalinizacijskih sustava s naglaskom na RO sustav kao najzastupljeniji. [5]

### **2.1.1. Sustav reverzibilne osmoze**

Sustav reverzne osmoze ili RO sustav je najrašireniji i najčešće istraživani sustav desalinizacije u svijetu. Rad sustava se temelji na polupropusnoj membrani koja odvaja soli i ione iz dovedene vode pod utjecajem hidrostatskog tlaka. Jednostavni shematski prikaz jednog RO sustava prikazan je na Slika 2.1.





Slika 2.1 Shematski prikaz RO proces [2]

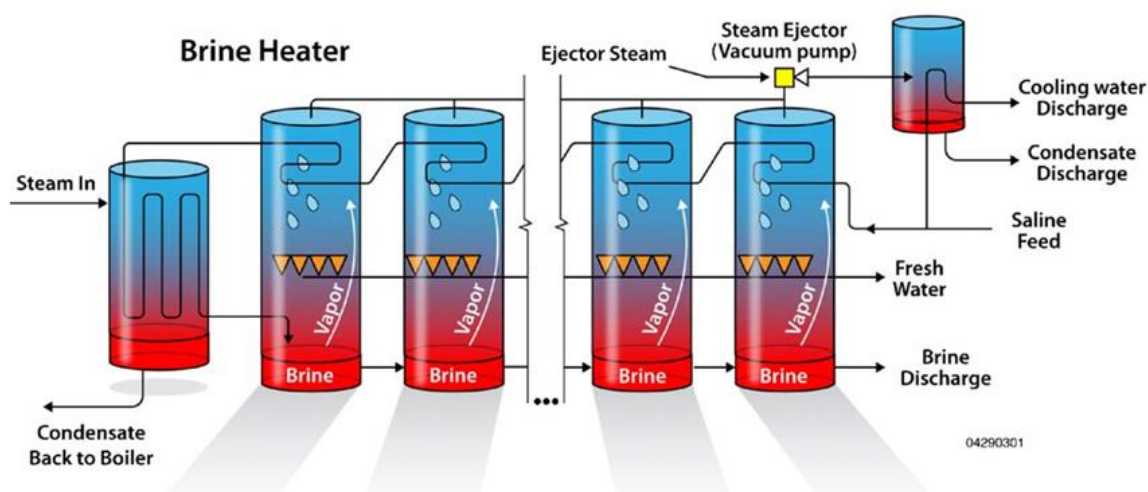
Potrebni hidrostatski tlak ovisi o osmotskom tlaku i količini otopljenih tvari (TDS) u morskoj vodi pa je tako za desalinizaciju bočate vode potreban tlak od 15-27 bara, dok je za desalinizaciju morske vode potreban tlak od 50-80 bara. Prethodna obrada vode je također potrebna kako nebi došlo do prebrzog oštećenja membrane zbog ulaska neželjenih tvari u sustav. Membrane koje se koriste u RO sustavu su celulozne acetatne i poliamidne membrane. Tijekom proteklog desetljeća, dva poboljšanja pomogla su smanjiti operativne troškove RO postrojenja, a to su: razvoj membrane koja može raditi učinkovito na nižim tlakovima i korištenje uređaja sa oporavkom energije. [2]

Upravo će zbog svojih kvaliteta, ekonomske dostupnosti, brzog i efikasnog razvijanja, te širokog raspona primjena, RO sustav biti promatran kao tehnologija desalinizacije hibridnog postrojenja na otoku Cresu.

## 2.1.2. Ostali sustavi

### 2.1.2.1. MSF sustav

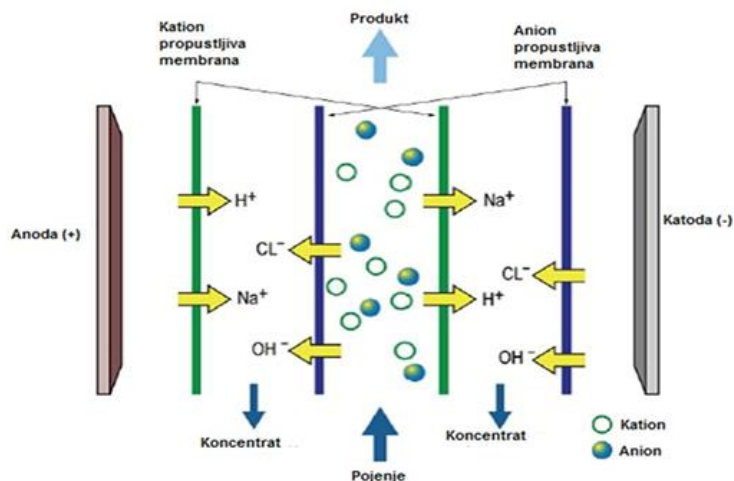
Višestupnjevita destilacija sadrži nekoliko isparivača u seriji kako je prikazano na Slika 2.2. Morska voda se predgrijava na visoku temperaturu te se dovodi pod vakuumom u prvi serijski isparivač gdje isparava te gubi dio topline koji služi za zagrijavanje koncentrata dobivenog iz sljedećeg isparivača. Para koja je dio topline izgubila odlazi u sljedeći isparivač u kojemu je tlak zasićenja niži što omogućava daljnje isparavanje i ponovno, dio topline se odvodi na zagrijavanje koncentrata koji dolazi iz sljedećeg isparivača. Proces se ponavlja ovisno koliko je isparivača povezano sve dok se ne zatvori krug.



Slika 2.2 Shematski prikaz MSF procesa [6]

#### 2.1.2.2. ED sustav

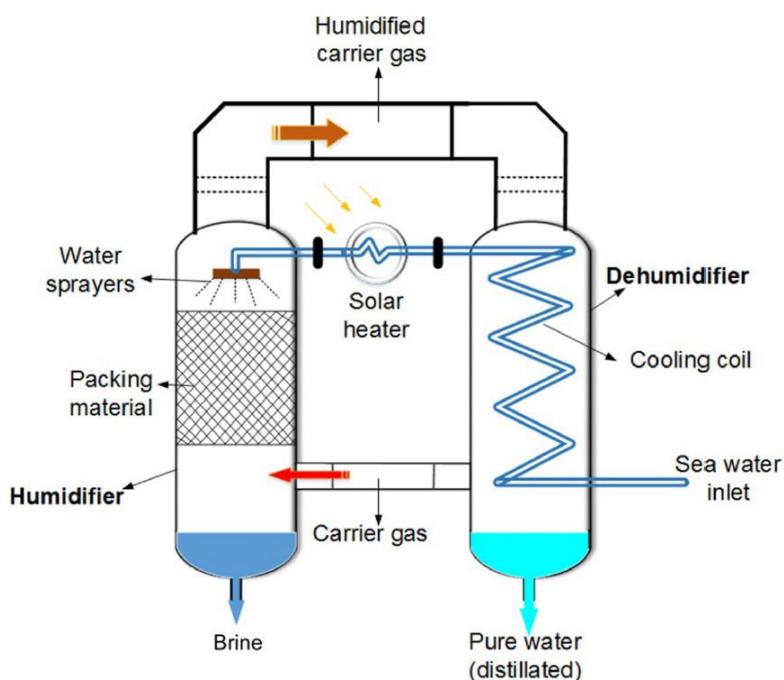
Elektrodijaliza je elektrokemijski proces razdvajanja soli iz vode pomoću sile koja je dobivena kao razlika električnog potencijala uslijed razlike u naboju i koncentraciji soli. Upravo se po tome razlikuje od standardnih membranskih sustava u kojem je sila dobivena razlikom tlakova (pumpom). Desalinizacija se odvija prolaskom vode kroz ion-selektivne membrane koje se nalaze između dviju elektroda kao što prikazuje Slika 2.3. Ovaj sustav nije pogodan za vode sa  $TDS > 5000$  mg/L.



Slika 2.3 Shematski prikaz ED procesa [7]

### 2.1.2.3. HDH sustav

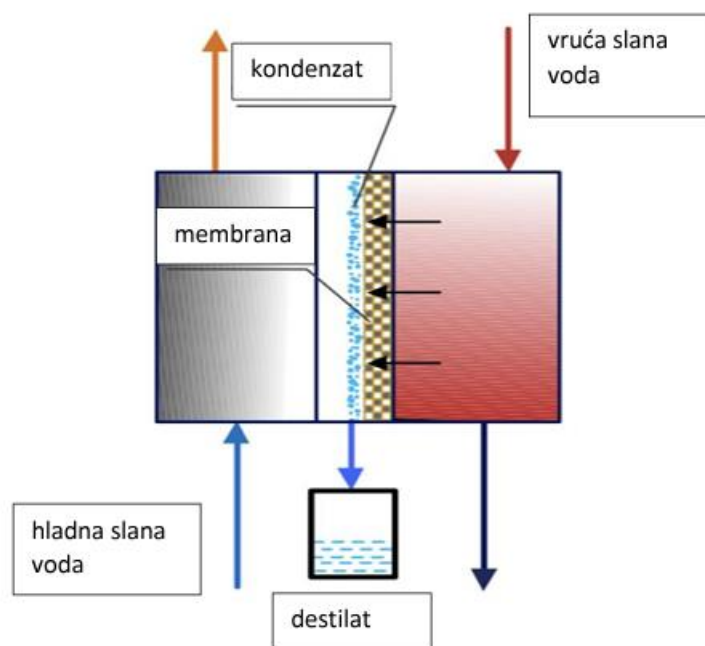
HDH sustav se bazira na izmjeni pare s morske vode na zrak. Zagrijana morska voda ulazi u sustav te se raspršuje u isparivaču kroz koji prolazi zrak. Zrak prima paru u obliku vlage, a količina pare koju će primiti ovisi o svojstvu korištenog zraka, točnije, o njegovoj temperaturi, tlaku i vlazi. Tako vlažan zrak nastavlja cirkulirati sustavom do kondenzatora gdje se odvlažuje, odnosno para sadržana u zraku kondenzira u obliku destilata. Primjer jednog jednostavnog HDH postrojenja nalazi se na Slika 2.4.



Slika 2.4 Shematski prikaz HDH procesa [2]

#### 2.1.2.4. MD sustav

Sustav membranske destilacije temelji se na hidrofobnoj membrani koja propušta isključivo pare. Ovo je, u pravilu, kombinacija membranskih i termalnih sustava gdje zagrijana morska voda isparava te je pokretačka sila prolaza kroz membranu postignuta temperaturnim gradijentom zato što je sa strane morske vode visoka temperatura potrebna isparavanje, dok na suprotnoj strani cirkulira morska voda niske temperature zbog postizanja kondenzata što zbog toplinske ravnoteže pokreće paru kroz membranu. Shematski prikaz procesa je vidljiv na Slika 2.5.



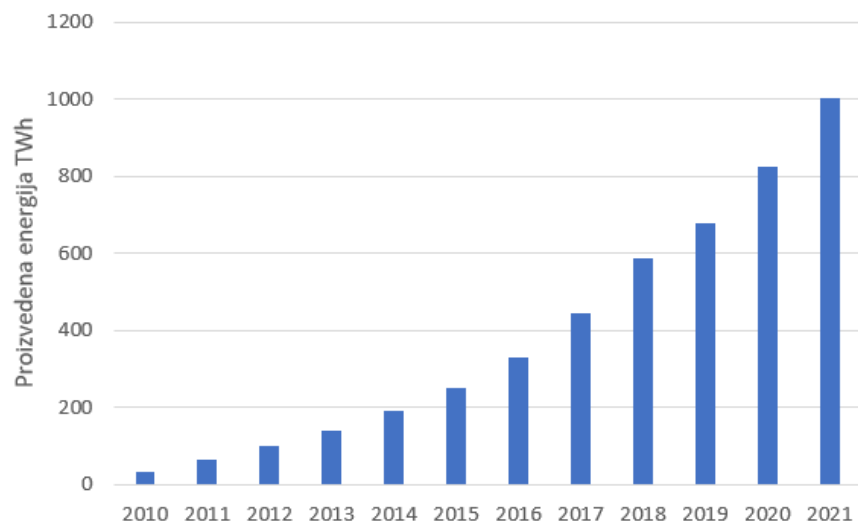
Slika 2.5 Shematski prikaz MD procesa [7]

### 3. SUSTAVI PLUTAJUĆE FOTONAPONSKE ELEKTRANE

Svi ljudi u svijetu neprestano koriste i trebaju energiju te jednako kao voda, ona predstavlja jedan od osnovnih uvjeta života. Ta potrebna energija za život dobiva se iz izvora energije koji se dijele na: neobnovljive i obnovljive izvore energije. U svijetu prevladavaju neobnovljivi izvori energije koji su poznati svojom ograničenošću, odakle dolazi i sam naziv, te po svojem štetnom utjecaju na okoliš kako se prilikom sagorijevanja fosilnih goriva stvaraju staklenički plinovi. Zbog još brojnih nedostataka, čovječanstvo pokušava nadomjestiti neobnovljive izvore s obnovljivima. Obnovljivi izvori energije u hrvatskom se Zakonu o energiji definiraju kao: „izvori energije koji su sačuvani u prirodi i obnavljaju se u cijelosti ili djelomično, posebno energija vodotoka, vjetra, neakumulirana sunčeva energija, biodizel, biomasa, bioplin, geotermalna energija itd.” [8]

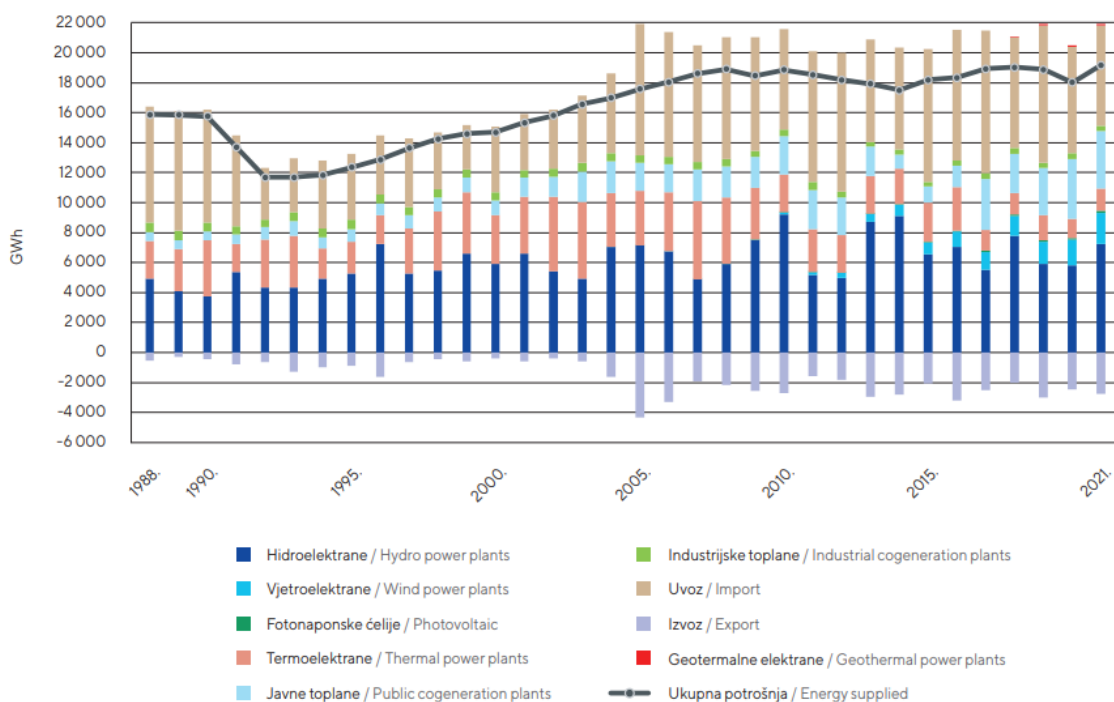
Sunčeva energija je jedan od glavnih obnovljivih izvora energije. Alexandre Edmond Becquerel, francuski fizičar, je 1839. godine otkrio fotonaponski učinak gdje se iz sunčeve svjetlosti izravno stvara električna energija. Više od 100 godina nakon toga je američki znanstvenik, Russell Ohl, izumio prvu silicijevu solarnu ćeliju te su upravo ova dva znanstvenika postavila temelje za razvijanje tehnologije fotonaponske elektrane koja koristi sunčevu energiju kao izvor dobivanja električne, ali i ostalih oblika energije potrebnih čovjeku.

Veliki i brzi razvoj fotonaponskih elektrana (eng. Photovoltaic – PV) u svijetu doveo je do njihovog pada u cijeni, čime su sada najjeftinija opcija proizvodnje energije iz obnovljivih izvora. Na Graf 3.1 Proizvodnja energije iz fotonaponskih elektrana [6] se može vidjeti porast proizvedene energije iz PV elektrana u zadnjih 10 godina.



Graf 3.1 Proizvodnja energije iz fotonaponskih elektrana [6]

U Hrvatskoj je s druge strane ta tehnologija i dalje nerazvijena. Kao što prikazuje Graf 3.2, do 2021. je udio proizvedene električne energije iz fotonaponskih elektrana zanemariv u odnosu na vjetroelektrane i hidroelektrane. Također se može primijetiti kako se uvozi više energije nego što bi trebalo, s obzirom na nekorištenje fotonaponskih elektrana sukladno mogućnostima Hrvatske. U bližoj budućnosti bi se trebalo okrenuti toj tehnologiji upravo zbog njenog razvoja u svijetu i tržišne dostupnosti. [9]

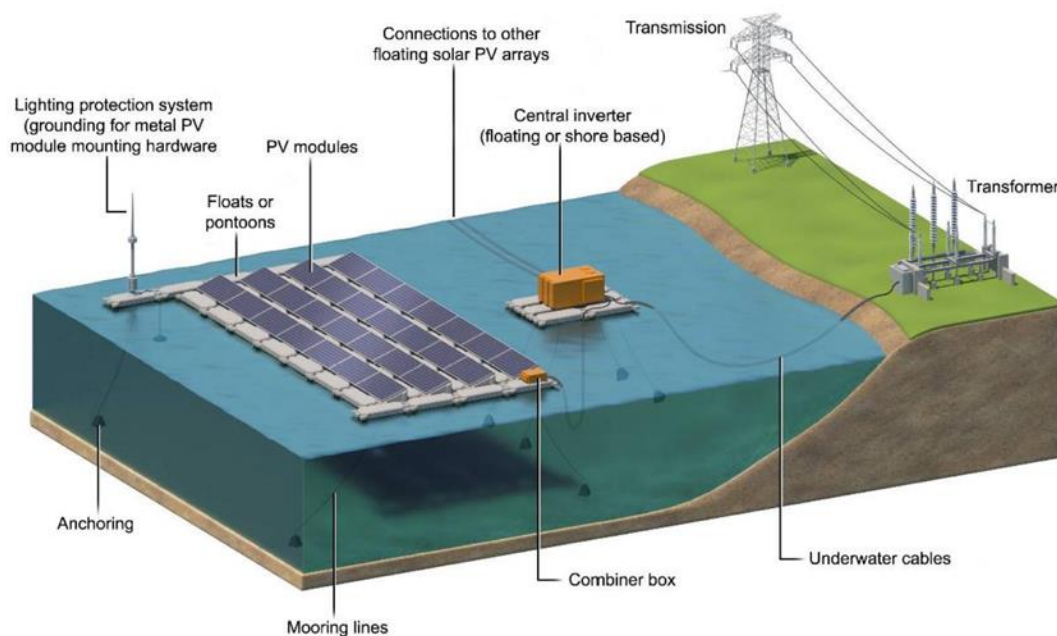


Graf 3.2 Usporedba proizvedene el. energije iz različitih izvora u Republici Hrvatskoj [9]

S ciljem poboljšanja ove tehnologije, razmatralo se o mogućim povećanjima korisnosti PV sustava, svladavanju zahtjeva velike potrebne površine za instalaciju te izlaganju većem sunčevom zračenju i jedan od mogućih načina je postavljanje solarne elektrane na vodene površine, tzv. plutajuće fotonaponske elektrane (eng. Floating photovoltaic - FPV).

### 3.1. Vrste i način rada plutajućih fotonaponskih elektrana

Plutajuće fotonaponske elektrane se po načinu rada ne razlikuju od uobičajenih PV elektrana. Sastoje se od istih dijelova kao i obični PV sustavi kao što su: gromobrani, PV moduli, inverteri, prespojne kutije itd. Jednostavni shematski prikaz jednog FPV sustava prikazan je na Slika 3.1.



Slika 3.1 Shematski prikaz FPV postrojenja [10]

Iz slike je vidljiva glavna razlika između FPV i kopnenih PV sustava: način postavljanja sustava, tj. konstrukcija na koju je postavljena FPV elektrana te sustav usidrenja. Tri su glavna oblika postavljanja FPV sustava:

#### 1) Iznad vode

Najčešći oblik postavljanja FPV sustava je upravo iznad vode gdje se sustav postavlja na plutajuću konstrukciju (najčešće pontone). Ovakav način postavljanja će se upotrijebiti za potrebe ovog rada. Na Slika 3.2 je prikazan primjer jednog takvog sustava





Slika 3.2 Primjer postavljenog FPV sustava iznad vode

2) Na vodi

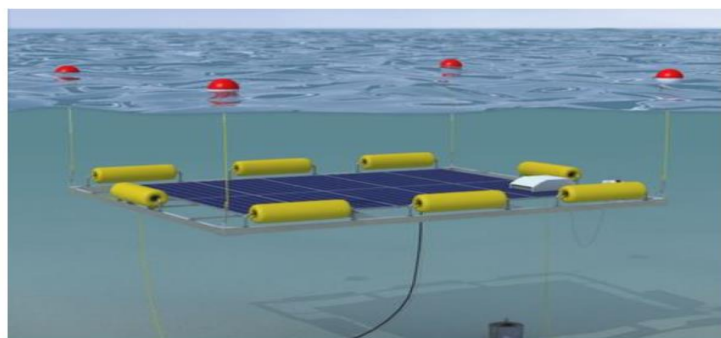
FPV sustav se postavlja direktno na vodenu površinu pomoću fleksibilne membrane što dodatno pospješuje učinak hlađenja. Na Slika 3.3 prikazana je navedena konstrukcija.



Slika 3.3 Primjer postavljenog FPV sustava na vodi [11]

3) U vodi

FPV sustav se potapa ispod vodene površine zbog dodatnog povećanja hlađenja, no moguća je pojava nastanjivanja morskih organizama. Slika 3.3 prikazuje izvedbu ovakvog postavljanja



Slika 3.4 Primjer postavljenog FPV sustava u vodi [12]

### 3.2. Prednosti i nedostaci plutajućih fotonaponskih sustava

FPV sustavi bi, postavljeni na vodene površine, eliminirali brojne zahtjeve uobičajenih solarnih elektrana, a neke prednosti i mane ovog sustava navedene su u Tablica 3.1. [13]

Tablica 3.1 Prednosti i mane FPV sustava

Prednosti	Mane
Ne zahtjeva kopnenu površinu – velike površine su potrebne za instalaciju PV elektrana što je poseban problem u gusto naseljenim i velikim gradovima	Nedovoljno istražena tehnologija – FPV tehnologija je relativno nedavno dobila na značaju te standardizirani oblici ovog sustava ne postoje
Smanjuje ishlapljivanje vodenih površina – ključno u područjima podložnim sušama	Visoka cijena sustava – s obzirom na nedovoljno istraživanje i razvijanje sustava, malen je broj proizvođača opreme ovakve tehnologije pa su sukladno tome i cijene visoke
Povećava iskoristivost PV modula – postavljanjem PV modula izravno na vodene površine postiže se učinak hlađenja modula što izravno povećava proizvedenu energiju modula	Složena optimizacija sustava – potrebne su velike preciznosti prilikom postavljanja i računanja optimalnog modela sustava kao i prilikom izvođenja konstrukcije
Jednostavna instalacija	Ograničena primjena
Izloženost većem sunčevom zračenju – moguća je rotacija sustava čime se direktno	

utječe na količinu dobivene energije iz zračenja	
Povećanje kvalitete vode – u slučaju postavljanja na jezerima, onemogućen je prodor određene količine svjetlosti čime se smanjuje rast algi	
Mogućnost hibridizacije sustava s drugim sustavima OIE – izravno se misli na postavljanje FPV sustava na akumulacijska jezera reverzibilnih ili običnih hidroelektrana što će biti detaljnije opisano u nastavku rada	

### 3.3. Razvoj i primjena plutajućih fotonaponskih sustava

Razvoj i primjena ovakvih sustava iz dana u dan je sve veća, što svakako ne čudi. Najveći FPV sustav nalazi se u Kini u gradu Dezhou sa snagom od 320 MW, a izgrađen je 2022. godine. Povezan je sa vjetroelektranom snage 100 MW te oba sustava koriste skladištenje energije u obliku baterija kapaciteta 8 MWh. Prema procjenama, ovaj sustav bi trebao proizvoditi oko 550 milijuna kWh energije godišnje. Ukupno 80 % instaliranih FPV sustava u svijetu nalazi se u Aziji, a u Kini se također nalaze druga i treća najveća plutajuća fotonaponska elektrana u svijetu. [14]



Slika 3.5 Najveći FPV sustav u svijetu, Dezhou u Kini [14]

Primjer još jedne velike FPV elektrane možemo vidjeti i u Singapuru. Sa oko 122.000 solarnih panela postavljenih preko 450.000 m<sup>2</sup>, Sembcorp plutajuća solarna elektrana ima snagu od 60 MW. [15]

Da su FPV sustavi sve poželjniji dokazuju i europske zemlje. Tako je u Nizozemskoj izgrađena plutajuća solarna elektrana u rekordnih 6 tjedana sa snagom od 14,5 MW [16] te je u tijeku izgradnja najvećeg ovakvog sustava u Europi sa snagom od 27,4 MW. Tvrtka BayWa r.e. je sama već izgradila preko 100 MW FPV sustava diljem Europe, ponajviše u Francuskoj, Nizozemskoj i Velikoj Britaniji, a također je i Grčka objavila kako planira instalirati ukupno 800 MW plutajućih solarnih elektrana. Njemačka je završila izgradnju svojeg najvećeg FPV sustava snage 1,5 MW na jezeru Rhineland-Palatinate. Iz navedenog se može vidjeti kako je FPV sustav zasigurno na dobrom pragu komercijalizacije što bi svakako smanjilo njegovu cijenu i omogućilo daljnji razvoj i integraciju ovakvih sustava. [17]



Slika 3.6 Sustav FPV, Sembcorp u Singapuru [18]



Slika 3.7 Sekdoorn FPV sustav u Nizozemskoj snage 14,5 MW [19]

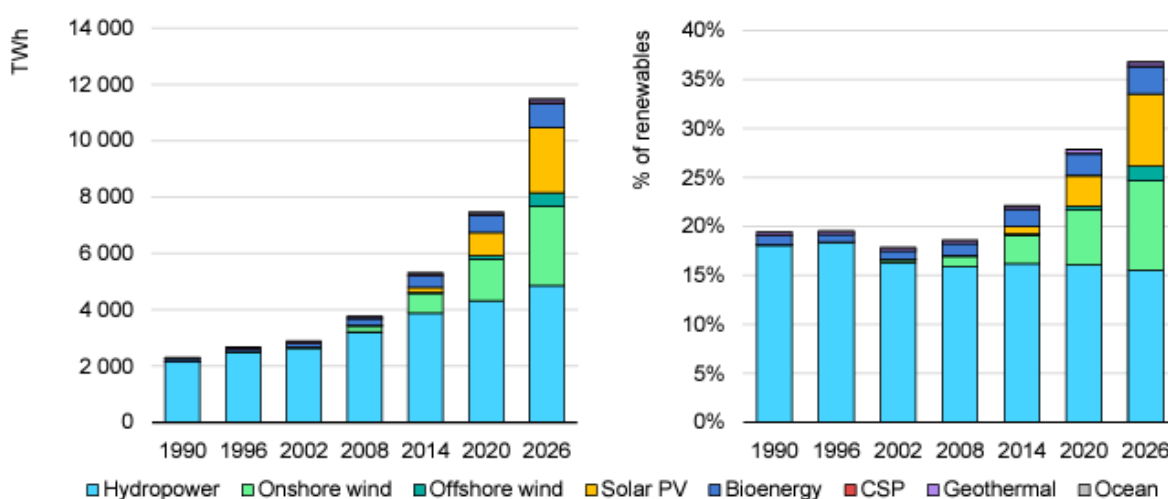
## 4. REVERZIBILNE HIDROELEKTRANE

### 4.1. Općenito o hidroelektranama

Potencijal vode, kao izvora energije, ljudi su prepoznali davnih dana te su ga primjenjivali u razne svrhe, od sustava navodnjavanja drevnih civilizacija sve do proizvodnje mehaničke energije potrebne za rad mlinova. Danas je voda jedan od najkorištenijih izvora energije implementiran, ponajviše, u obliku hidroelektrana.

Hidroelektrane su energetska postrojenja koja koriste hidropotencijal za dobivanje električne energije gdje se energetska preobrazba odvija u 3 stupnja. Potencijalna energija vode uslijed djelovanja gravitacije se pretvara u kinetičku energiju, bilo prirodno (vodeni tokovi), ili prisilno (akumulacijska jezera). Kinetička se energija dalje pretvara u mehaničku prolaskom vode kroz glavni dio postrojenja, turbinu. Za dobivanje električne energije, u zadnjem se stupnju vrtnjom vratila turbine okreće i rotor električnog generatora koji proizvodi električnu energiju.

Može se reći kako su hidroelektrane najpouzdaniji obnovljivi izvor energije što se potkrepljuje činjenicom da se iz njih proizvodi najviše električne energije u svijetu od ukupno proizvedene energije iz OIE. Na Graf 4.1 je prikazana usporedba proizvodnje energije svih OIE kroz povijest i, uz pretpostavke, u budućnosti.



Graf 4.1 Usporedba ukupne proizvodnje energije iz OIE [1]

Trenutna ukupna godišnja proizvodnja energije iz hidroelektrana iznosi 4.202,2 TWh što čini 17% od ukupno proizvedene električne energije u svijetu. Usporedbe radi, 28% svjetske električne energije je proizvedeno iz OIE, što hidroelektrane čini daleko najvećim proizvođačima energije iz skupine OIE. [1]

## 4.2. Podjela hidroelektrana

Glavna podjela hidroelektrana je prema načinu korištenja u koje ubrajamo: akumulacijske, protočne i reverzibilne hidroelektrane.

### 4.2.1. Akumulacijske HE

Ova skupina HE je najzastupljenija u svijetu. Gradnjom brane stvara se ogroman spremnik vode (akumulacijsko jezero) gdje se prilikom zahtjeva za proizvodnjom električne energije voda dovodi do turbine kroz tlačni cjevovod. Snaga hidroelektrane ovisi o visinskoj razlici između površine akumulacijskog jezera i odvodu vode nakon iskorištavanja njene kinetičke energije te o protoku vode kroz turbinu. Najveća hidroelektrana na svijetu nalazi se u Yichangu, Kini, s ukupnom instaliranom snagom od 22.500 MW te je primjer akumulacijske HE. [20]



Slika 4.1 Najveća HE na svijetu, Tri klanca na rijeci Yangtze [20]

### 4.2.2. Protočne HE

To su najčešće jednostavne riječne hidroelektrane koje imaju malu ili uopće nemaju akumulaciju. Poznate su po tome što imaju neznatan utjecaj na okoliš. Najvažniji kriterij za rad

ovakve HE je odabir lokacije upravo zato što direktno ovise o vodostaju rijeke koji je promjenjiv te samim time ovakve HE nisu baš pouzdane.

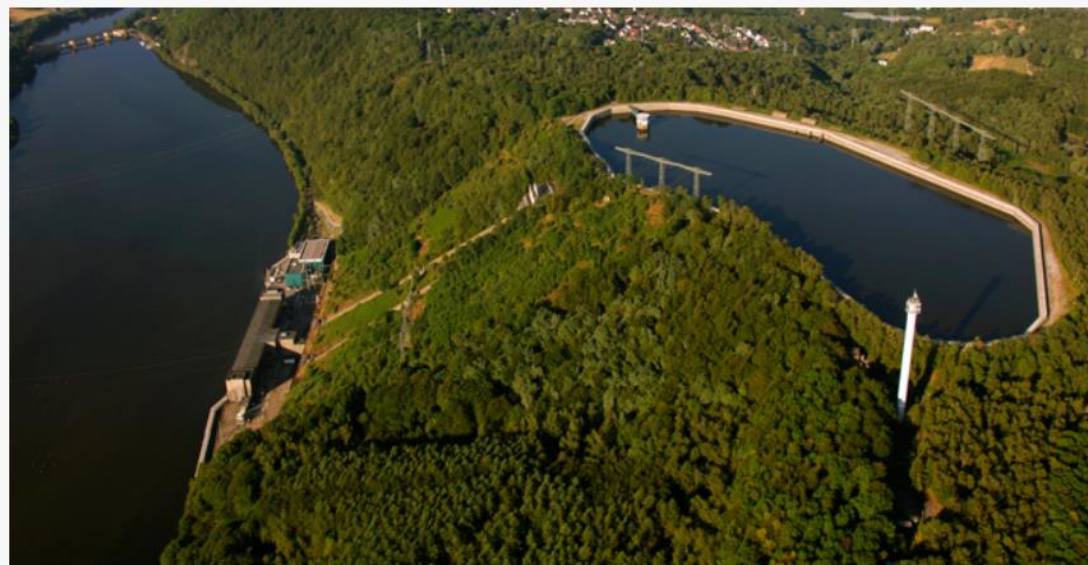


Slika 4.2 Primjer protočne HE

#### **4.2.3. Reverzibilne HE**

Reverzibilne ili crpno-akumulacijske HE su postrojenja u kojima postoje dvije akumulacije, odnosno dva spremnika vode. Razlog tomu je njihovo korištenje u obliku skladišta energije na način da se prilikom velike potražnje energije, voda propušta kroz tlačni cjevovod iz gornjeg akumulacijskog jezera u donje te se električna energija proizvodi kao u slučaju akumulacijskih HE. Kada je potražnja za energijom niska, voda se iz donjeg akumulacijskog jezera pumpa u gornje radi osiguranja kako nebi došlo do previsokog zahtjeva za energijom, odnosno pohranjuje se energija. Jasno je da se povećanjem visinske razlike između spremnika vode, povećava i snaga HE. Primjer jedne reverzibilne HE nalazi se na Slika 4.3.





Slika 4.3 Primjer RHE [21]

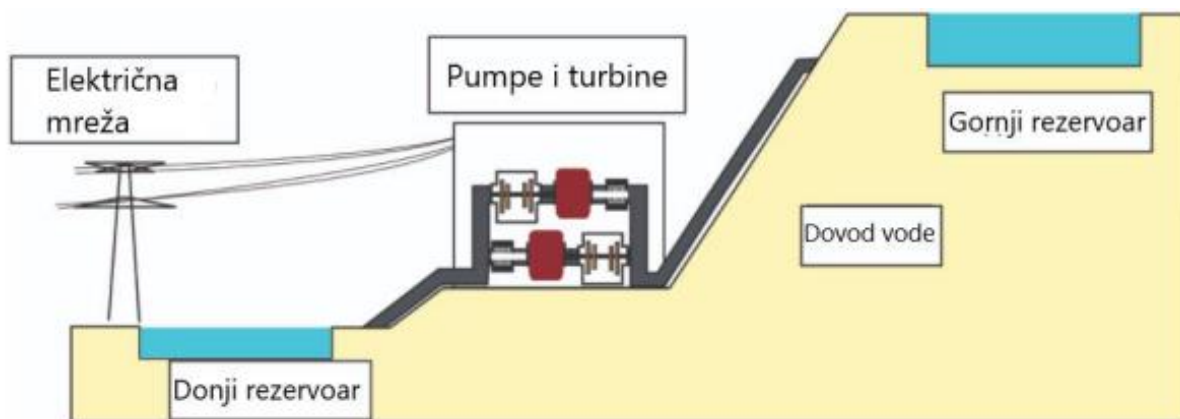
HE se još mogu podijeliti prema:

- 1) padu vodotoka na: niskotlačne – s padom do 20 metara, srednjetačne – s padom između 20 i 100 metara i visokotlačne – s padom preko 100 metara,
- 2) načinu na koji se ostvaruje pad vodotoka: derivacijske, pribranske ili je moguća kombinacija ovih dviju.

#### 4.3. Opis, prednosti i mane reverzibilne hidroelektrane

RHE sustavi su, kako je već spomenuto, posebni oblici hidroelektrana. Postoje dvije izvedbe ovakvih elektrana prema načinu rada turbina i pumpi. Moguća je izvedba gdje se turbina i pumpa odvojeno koriste i kada je potrebno proizvoditi energiju, uključuje se turbina te se voda pušta prema donjem akumulacijskom jezeru, a kada je zahtjev za energijom manji, uključuje se pumpa i šalje vodu natrag u gornje akumulacijsko jezero. Ovakvo postrojenje naravno ima minimalno 2 cjevovoda, a česte su izvedbe i sa više. Druga mogućnost je korištenje reverzibilne turbine koja se prilagođava režimu ovisno o potrebama sustava pa može poslužiti i kao pumpa i kao turbina. Najpoznatija takva turbina je Francisova reverzibilna turbina, dok se kao obične turbine još ugrađuju Kaplanove kod niskotlačnih HE te Peltonove kod visokotlačnih HE. Također možemo razlikovati RHE otvorenog i zatvorenog tipa te njihovu kombinaciju. Kod zatvorenih su RHE gornji i donji spremnik vode odvojeni od vodotoka, najčešće kao prirodna ili umjetna jezera. Umjetna akumulacija vode se događa prepumpavanjem i propuštanjem vode, a prirodna akumulacije se izvodi u obliku ishlapljivanja te nadomještanja prirodnim putem.

RHE otvorenog tipa su izravno povezani sa vodotocima i rade na principu akumulacijskih HE. Moguća je i kombinirana izvedba koja je najčešće i najisplativija jer se na već postojeće HE akumulacijskog tipa mogu nadograditi vodeni spremnici na potrebnim visinama, ako to uvjeti dozvoljavaju, te se povezivanjem dobiva upravo RHE. Postoji li pak prirodni spremnik vode u obliku jezera blizu HE, jednostavnim povezivanjem tlačnim cjevovodima bi se također postigla najoptimalnija izvedba RHE. Jednostavna shema jedne RHE nalazi se na Slika 4.4.



Slika 4.4 Shematski prikaz RHE [22]

Iskoristivost RHE varira između 70-85 %, no kao najveći spremnici energije današnjice, otvaraju mnoge mogućnosti i koristi. Primjerice, hibridizacije sa drugim OIE, poput solarnim i vjetroelektranama, su izvrstan način iskorištavanja maksimalnog potencijala svih triju postrojenja. S obzirom na nepredvidljive količine proizvedene energije solarnih i vjetroelektrana, RHE bi upravo pohranio viškove proizvedene energije i koristio ih kada ne bi bilo sunca ili vjetra, te se ti viškovi ne bi promatrali kao gubici. RHE mogu i samostalno balansirati proizvodnju i potrošnju energije neovisno o njihovoj hibridizaciji te direktno utječu na preopterećenje elektroenergetskog sustava. To omogućava upravo njihovo brzo pokretanje sustava gdje se konvencionalne elektrane poput nuklearnih ili parno-turbinskih elektrana ne mogu uspoređivati. Također služe i kao optimalna zamjena za nuklearne ili termoelektrane s obzirom na njihove negativne strane: velike emisije stakleničkih plinova i ekološki neprihvatljivo gorivo, a mogu jednako dobro, najčešće i uz veću fleksibilnost, zadovoljavati potrebe za energijom. RHE isto kao i obične HE imaju vrlo dug životni vijek pa su i s te strane isplativa tehnologija u dugoročnom periodu.

Kao i sve elektrane u svijetu, i RHE imaju negativne strane. Najveća mana ovakvih postrojenja je njihova cijena. Zahtjevnost izgradnje ovakvog postrojenja je izrazito velika s obzirom na sve postavljene uvjete. Ukoliko bi se i našla pogodna lokacija za ovakvo postrojenje, sama izgradnja bi tražila velike investicijske troškove, najveće u slučaju gradnje spremnika, stoga se često pribjegava opciji gradnje samo jednog akumulacijskog spremnika te korištenjem prirodnog jezera u obliku drugog spremnika. To naravno otežava pronalaženje pogodnih lokacija. Visinska razlika je također bitan čimbenik pa je i s te strane teško pronaći pogodno mjesto za izgradnju. Mora se moći povezati oba spremnika na cjevovodima na ekonomski prihvatljiv način, što postavlja dodatan zahtjev. Uz sve to RHE mora biti lako dostupna radi održavanja i upravljanja pa je nepotreban dodatan trošak izgradnje cesta ili drugačijih pristupa. Narušavanje ekosustava je isto tako veliki problem prilikom izgradnje RHE s obzirom da je potrebna velika površina za njihovu instalaciju. Posljedično dolazi do migriranja životinjskog svijeta, bilo vodenog ili kopnenog, i direktno se utječe na prirodni vodotok u slučaju takve vrste RHE. Iako se HE/RHE smatraju kao izvori energije sa najmanje emisija stakleničkih plinova, to nije slučaj u tropskim područjima gdje se prilikom ugibanja biljnog svijeta u anaerobnim uvjetima proizvode velike količine metana. Svi ovi uvjeti zahtijevaju puno uloženog truda i vremena u projektiranju i ekonomskoj analizi RHE, a samo mala nepreciznost može dovesti do katastrofalnih posljedica poput popuštanja brane. Upravo zbog svega navedenoga je RHE najlakše samo nadograditi na već postojeće akumulacijske HE.

Najveća RHE stacionirana je u Kini i puštena je u pogon na početku 2022. godine. Nalazi se u provinciji Hebei, a sastoji se od 12 reverzibilnih turbina koje čine ukupnu snagu postrojenja od 3,6 GW, a kapacitet spremnika je 6.612 milijuna MWh. Da je Kina ozbiljno shvatila potencijal ovakvih postrojenja pokazuje kako do 2030. godine planira instalirati 62 GW ukupne snage sadržane u RHE, a trenutno je ostvarila nešto manje od pola, odnosno 30,3 GW. Najveća europska RHE smještena je u Španjolskoj gdje je na već postojeću HE na rijeci Jucar, snage 290 MW, spojeno gornje akumulacijsko jezero 1989. godine. Sastoji se od 3 reverzibilne turbine ukupne snage 643 MW, odnosno 540 MW za pumpanje. Godine 2013. je akumulacijsko jezero prošireno sa još 4 reverzibilne turbine ukupne snage 878 MW, odnosno 740 MW za pumpanje te sada ovo postrojenje broji snagu od 1,8 GW, a pri optimalnim uvjetima proizvodi 1.625 GWh energije u godini. Visinska razlika između dvaju spremnika iznosi 524 m. [23], [24]



Slika 4.5 Najveća RHE u svijetu, provincija Hebei u Kini [23]



Slika 4.6 Najveća RHE u Europi smještena na rijeci Jucar u Španjolskoj [24]

## **5. HIBRIDNI SUSTAV REVERZIBILNE OSMOZE, PLUTAJUĆE FORONAPONSKE ELKTRANE I REVERZIBILNE HIDROELEKTRANE**

U prijašnjim poglavljima su objašnjeni RO, FPV i HE/RHE sustavi s ciljem oblikovanja postrojenja koje bi sadržalo sva tri sustava gdje bi se oni međusobno okoristili jedni od drugih. RO sustav desalinizacije, kako je prije rečeno, je bitan sustav za proizvodnju pitke vode, no on zahtjeva visokotlačne pumpe potrebne za svladavanja osmotskog tlaka, koje troše velike količine energije, točnije oko  $2-5 \text{ kWh/m}^3$ , što ovisi o salinitetu [2]. Kako bi se izbjegla proizvodnja energije iz fosilnih goriva potrebne za rad RO sustava, otvara se mogućnost primjene solarne elektrane u tu svrhu. Glavni problem solarnih elektrana je ograničena proizvodnja energije koja je moguća isključivo tijekom dnevnih sati što također ovisi o dobu godine te se mora pribjegavati dodatnim načinima proizvodnje energije s obzirom da je potreba za vodom prisutna svakog sata u danu. Implementiranjem hidroelektrane kao dodatnog sustava proizvodnje energije stvara se odlična ravnoteža. Tijekom dana, kada ima dovoljno sunčevog zračenja se energija dobiva iz solarne elektrane, a kada ona nije u mogućnosti isporučiti potrebnu energije RO sustavu, uključuje se hidroelektrana. Navedena je hibridizacija proučavana s ciljem energetskog i vodenog osamostaljenja otoka koji uveliko ovise o skupom uvozu vode i energije te ispunjavaju puno kriterija za primjenu RO/FPV/RHE sustava.

### **5.1. Prednosti i mane hibridnog postrojenja**

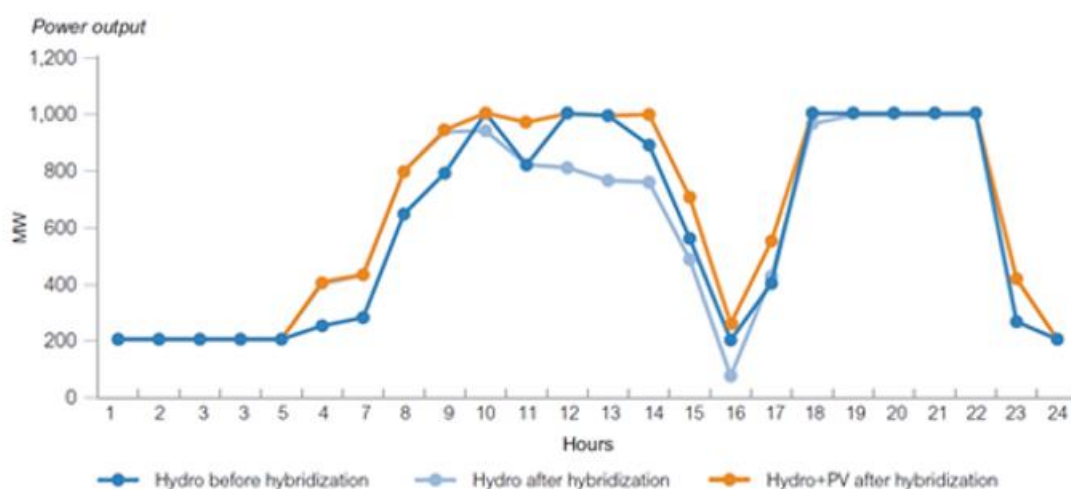
FPV i RHE postrojenje broji mnoge prednosti. Površina za postavljanje plutajućih solarnih elektrana je upravo jedno od akumulacijskih jezera reverzibilne hidroelektrane, a samim time se omogućuje spajanje obiju elektrana na isti elektroenergetski sustav te se smanjuje evaporacija jezera čime se dodatno osigurava učinak hidroelektrane. Također, ova dva sustava izvrsno nadopunjavaju svoje mane, ne samo na dnevnoj razini, već i na sezonskoj, odnosno godišnjoj. Tijekom sušnih dijelova godine, HE proizvodi manje energije, dok s druge strane FPV iskorištava svoj puni potencijal, a tijekom kišnih razdoblja, smanjena je količina sunčeva zračenja, no povećava se hidropotencijal. Prilikom većih zahtjeva za energijom moguća je preopterećenost sustava pa bi RHE bila i najbolja opcija skladištenja energije. Pohrana energije je moguća tijekom maksimalne proizvodnje iz FPV sustava, gdje se razlika proizvedene i potražne energije upravo koristi za pumpanje vode iz donjeg u gornje akumulacijsko jezero te

prilikom velike potražnje kada FPV sustav ne proizvodi ili proizvodi nedovoljno energije, ta se energija koristi za rasterećenje sustava. [25]

Bitno je naglasiti kako postoje i prepreke za ostvarivanje ovakvog projekta. Primjerice, nedovoljna istraživanja FPV sustava uzrokuju veliku cijenu u nabavi materijala i opreme za provedbu sustava, a s druge strane, investicijski troškovi RHE su sami po sebi iznimno veliki. Osim cijene, važan je i odabir lokacije. Za RHE su potrebni otoci sa dovoljnim visinskim razlikama kako bi sustav uopće bio isplativ, a također se odabirom lokacije za oba sustava ne smije narušiti biološka ravnoteža pa se s relevantnim stručnjacima za zaštitu prirode i okoliša moraju provesti brojna istraživanja. Lokacija sustava mora biti i blizu obale kako bi se lakše dovela energija do sustava desalinizacije, ali isto tako mora biti i pristupačna zbog lakšeg upravljanja i održavanja sustava. [25]

## 5.2. Primjena hibridnih sustava

Najveći PV/HE sustav u svijetu napravljen je u Qinghaiu u Kini. HE Longyangxia napravljena je 1989. godine sa 4 turbine po 320 MW, tj. ukupne snage od 1280 MW. Zbog pojava sušnih razdoblja i nedovoljno dobro odabrane lokacije, hidroelektrani je pridružen sustav solarnih elektrana u 2013. godini od 320 MW maksimalne snage radi rasterećenja HE, a 2015. je dodano još 530 MW. Na Graf 5.1 se može vidjeti usporedba izlaznih snaga HE prije hibridizacije, HE nakon hibridizacije i hibridnog postrojenja HE/PV. [26]



Graf 5.1 Usporedba rada HE prije i poslije ugradnje PV sustava i rad ukupnog sustava [26]

Također je u Kini u tijeku novi PV/HE projekt koji bi na već postojanu HE na rijeci Yalong, jačine 3 GW, spojio solarnu elektranu snage 1 GW. Sastojat će se od oko 2 milijuna solarnih panela i preko 5.000 invertera te bi se izgradnja trebala završiti do kraja 2023. godine. Uz to se planira pustiti u pogon još postrojenja OIE na tom području čija bi ukupna snaga bila 80 GW, uključujući 40 GW iz solarnih i vjetroelektrana te 10 GW iz reverzibilne hidroelektrane. [27]

Prvo ikad FPV/HE postrojenje napravljeno je u Montalegru u Portugalu. Snaga postrojenja je relativno mala, 220 kW, što i ne čudi s obzirom na nedovoljno istraženu tehnologiju. [26]



Slika 5.1 Prvo ikad FPV/RHE postrojenje, Montalegru u Portugalu [26]

Potencijal ovakvih sustava je ipak brzo prepoznat pa je tako 31.10.2021. pušten u pogon najveći FPV/HE sustav u svijetu. Nalazi se na Tajlandu na brani Sirindhorn, a ukupna mu je izlazna snaga 45 MW. Plutajući fotonaponski sustav prekrivaju svega 1% ukupne vodene površine, ali samim time smanjuju ishlapljivanje akumulacijskog jezera za 460.000  $m^3$ /god. Upravo zbog učinkovitosti i isplativosti ovog sustava, EGAT (The Electricity Generating Authority of Thailand) planira nastaviti ugrađivati FPV na postojeće HE, pa im je sljedeći projekt izgraditi plutajuću solarnu elektranu jačine 24 MW na brani Ubol Ratana. [28]



**Slika 5.2** Najveći FPV/HE sustav u svijetu, Tajland [28]

Najveća plutajuća solarna elektrana, u kombinacija sa RHE, u Europi, puštena je u pogon u ljeto 2022. godine. Sa snagom od 5 MW prekriva ukupnu površinu od 0,016% jezera Alqueva u Portugalu. Ovo je primjer FPV/RHE sustava gdje je FPV sustav postavljen na gornje akumulacijsko jezero reverzibilne hidroelektrane dovršene 2017. godine, a koja ima snagu od 520 MW te radi sa 4 reverzibilne Francisove turbine. [29]



**Slika 5.3** FPV/RHE sustav Alqueva, Portugal [29]



## 6. PRIMJENA HIBRIDNOG POSTROJENJA NA OTOKU CRESU

### 6.1. Općenito o otoku Cresu

Cres je otok smješten u Hrvatskom primorju te je površinom najveći otok Hrvatske. Odabran je za realizaciju navedenog projekta upravo zbog svojih obilježja koji pogoduju jednostavnijoj i ekonomičnijoj izvedbi opisanog hibridnog postrojenja. Cres ima vlastiti izvor pitke vode u obliku Vranskog jezera, koja se pročišćava i distribuira cijelom arhipelagu Cres-Lošinj vodoopskrbnim sustavom kojim upravlja Društvo Vodoopskrba i odvodnja Cres Mali Lošinj d.o.o. u vlasništvu gradova Cres i Mali Lošinj. Slika 6.1 prikazuje arhipelag Cres-Lošinj. Vransko jezero je svojevrsni prirodni fenomen s obzirom da se najdublja točka jezera nalazi na dubini od 61,5 m ispod razine mora, a jezero nema vidljivih dotoka ni ponora. Vodoopskrbni sustav se sastoji od sjevernog i južnog ogranka. Sjeverni ogranak, dužine 17 km, opskrbljuje naselja Valun, Zbičinu, Pernat, Lubenice i Cres dok južni ogranak, dužine 45 km, opskrbljuje naselja Vrana, Hrasta, Belej, Ustrine, Osor, Nerezine, Sveti Jakov, Čunski, Artatore i Mali Lošinj. Dodatni ogranci spojeni direktno na južni ogranak, opskrbljuju Stivan, Miholašćicu i Martinšćicu te Punta Križu. Također se posebnim načinima poput autocisterni, brodom vodonoscem i podvodnim cjevovodima opskrbljuju naselja koja nisu direktno spojena na navedene ogranke. Kako se i dalje ne znaju precizni podaci vezani uz Vransko jezero u pogledu njegova crpljenja i mogućnosti prodiranja slane vode u njega, već opisani RO desalinizacijski sustav bi u okviru ovog projekta osiguravao dodatno punjenje Vranskog jezera. Također, s obzirom da se na Cresu i okolici provodi nekoliko projekata u sklopu energetske i klimatske održivog razvoja, opravdano je pretpostaviti da će se u skoroj budućnosti povećati domicilno stanovništvo kao i prisutnost turista uslijed razvoja samog otoka, što dovodi do povećane potražnje za vodom. [30]

Postavljeni sustav desalinizacije bi svojom potrebom za električnom energijom stvorio priliku postavljanja OIE kao pokretača ovog sustava čime bi se izravno utjecalo na energetske razvoj navedenog arhipelaga. Vransko jezero bi svojom velikom površinom tako osiguralo mjesto postavljanja plutajuće solarne elektrane koja će, kako je u nastavku objašnjeno, proizvoditi dovoljno energije za rad RO sustava jer se oko Vranskog jezera ne nalaze nikakva prirodna ili umjetna zasjenjenja u udarnim satima proizvodnje (sati s najviše sunčeva zračenja) pa se iskorištava puni potencijal sunčeva zračenja. Također bi postavljanje FPV sustava smanjilo

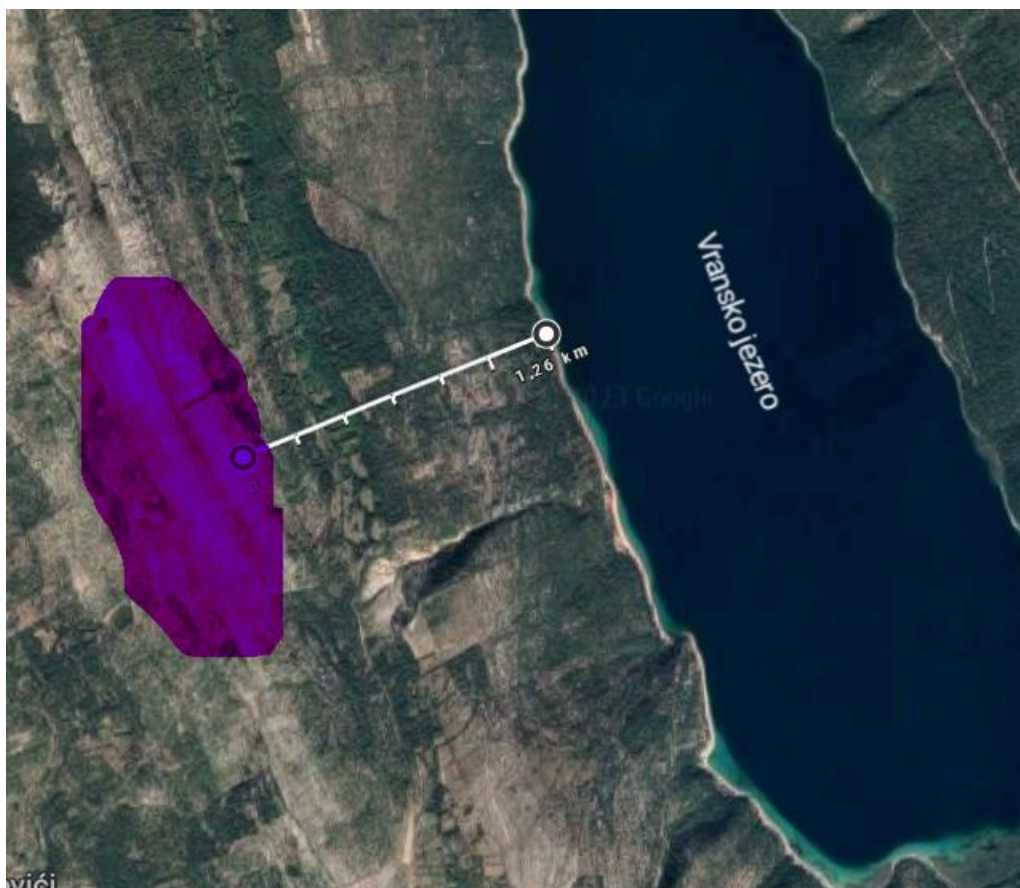
ishlapljivanje jezera što dodatno osigurava jezero od prevelikog iskorištavanja i mogućeg rizika zaslanjivanja jezera zbog prekomjernog iskorištavanja.



Slika 6.1 Arhipelag Cres-Lošinj [31]

Napomenuto je u prijašnjim poglavljima da je FPV sustav nepredvidljiv i da bi kao takav morao koristiti dodatne OIE kako bi se osigurala potrebna energija RO sustavu. Stoga je zaključak da će RHE biti pogodna opcija za rješavanje problema intermitentnosti FPV. Vransko jezero bi se naravno koristilo kao donje akumulacijsko jezero RHE što smanjuje investicijske troškove te omogućava spajanje oba sustava na istu elektroenergetsku mrežu. Brdoviti reljef samog otoka pogoduje za ostvarivanje dovoljne visinske razlike među dvama spremnicima i postoji nekoliko

potencijalnih lokacija za izgradnju dodatnog, u ovom slučaju gornjeg, akumulacijskog jezera. Slika 6.2 prikazuje pogodnu lokaciju za gornje akumulacijsko jezero s obzirom da se nalazi na otprilike 400 m.n.v., blizu je Vranskom jezeru i područje je pristupačno zato što se nalazi nadomak ceste koja povezuje naselja Mali podol i Grmov [32].



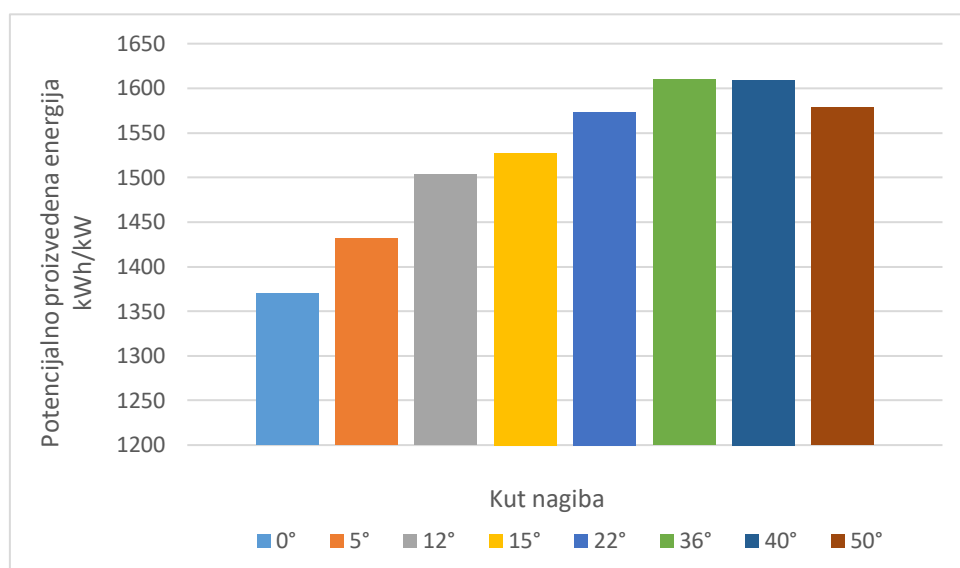
Slika 6.2 Lokacija gornjeg akumulacijskog jezera

U nastavku će biti definirani sustavi i metode korištene za ostvarivanje RO/FPV/RHE hibridnog postrojenja.

## 6.2. Plutajuća fotonaponska elektrana

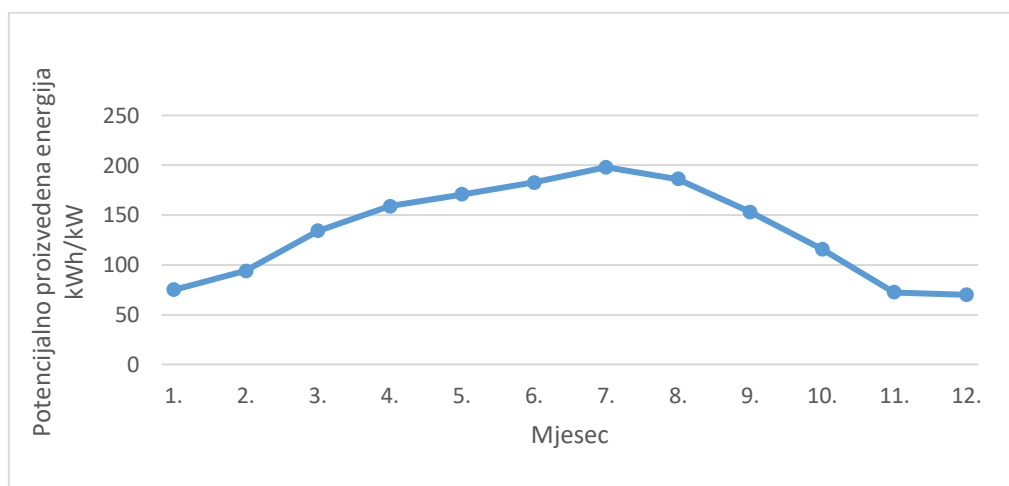
Prilikom odabira sustava fotonaponske elektrane prvo je razmatrano njegovo postavljanje. Proizvedena energija FPV sustava ovisi o količini sunčeva zračenja koje solarni panel uspijeva pretvoriti u energiju te se različitim kutovima postavljanja dobivaju različite vrijednosti potencijalno proizvedene energije pa je potrebno odabrati optimalan nagib. Prema dostupnim podacima [33], [34] je izračunata ukupna godišnja proizvodnja energije u ovisnosti o snazi

elektrane za 8 različito odabranih nagiba. Graf 6.1 prikazuje usporedbu dobivenih rezultata te je vidljivo kako je najoptimalniji odabir za Vransko jezero kut od 36°.



Graf 6.1 Usporedba 8 različitih nagiba

Također na Graf 6.2 možemo vidjeti količinu potencijalno proizvedene energije (u ovisnosti o snazi elektrane) na Vranskom jezeru po mjesecima u godini za odabrani nagib.



Graf 6.2 Potencijalno proizvedena energija u svakom mjesecu za nagib od 36°

Tijekom odabira sustava potrebno je voditi računa o cijeni pojedinih komponenata te je prema [35] dana Tablica 6.1 iznosa svih troškova (svedenih na snagu elektrane) potrebnih za realizaciju plutajuće fotonaponske elektrane.

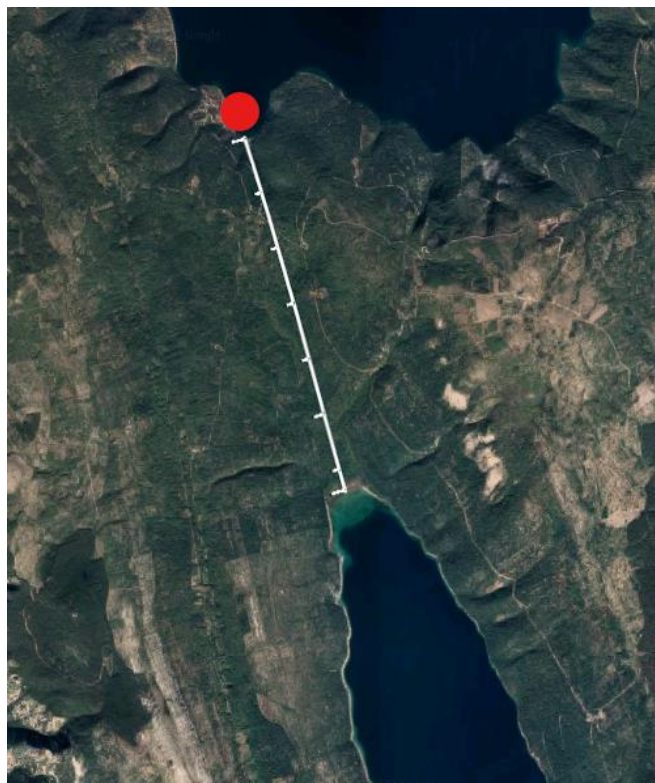
Tablica 6.1 Troškovi FPV sustava

Komponenta	Cijena (€/kW)
PV modul	330
Elektrooprema	80
Inverter	40
Izgradnja	60
Konstrukcija	260
Spoj na mrežu i trafostanicu	80
Ostalo	280
<b>Ukupna početna investicija</b>	<b>1130</b>
Troškovi održavanja (godišnji)	15,5
Veliki remont (svakih 9 godina)	120

Vidljivo je kako su najveći trošak PV moduli koji predstavljaju 29 % ukupne investicije. Trošak konstrukcije predstavlja 23 % ukupne investicije te zajedno sa PV modulima čini više od pola ukupnog investicijskog troška. Pod ostalim troškovima podrazumijevamo troškove transporta, projektiranja, dobivanja dozvole, puštanja u pogon te dodatne neplanirane troškove. U veliki servis svrstavamo troškove zamjene elektroopreme uključujući trošak invertera i pretpostavljeno je kako će se provoditi svakih 9 godina. Za potrebe zadatka je odabrana snaga elektrane u iznosu od 5 MW.

### 6.3. Desalinizacijski sustav

Kako je već naglašeno, za desalinizacijski sustav je izabran sustav reverzne osmoze. Jedna od mogućih lokacija navedenog sustava prikazana je na Slika 6.3 te je izabrana zbog blizine Vranskom jezeru i na označenom području se nalazi naselje Valun pa sustav ne bi bio izoliran i teško dostupan.



Slika 6.3 Lokacija RO sustava

Hibridno postrojenje bi funkcioniralo na način da se sustav reverzne osmoze pogoni isključivo energijom dobivenom iz plutajuće fotonaponske elektrane stoga se može zaključiti da će odabir snage FPV sustava odrediti količinu proizvedene vode RO sustavom. Prema dostupnim podacima [33], [34], izračunato je kako bi sustav kapaciteta od  $8000 \text{ m}^3/\text{d}$  zadovoljio potrebe dana s najvećim zahtjevima za vodom te je stoga korišten sustav prema [36], prilagođen traženim uvjetima. Tablica 6.2 sadrži komponente ovog sustava zajedno sa njihovom cijenom svedenom na proizvedenu dnevnu količinu vode te dodatne potrebne troškove za realizaciju sustava.

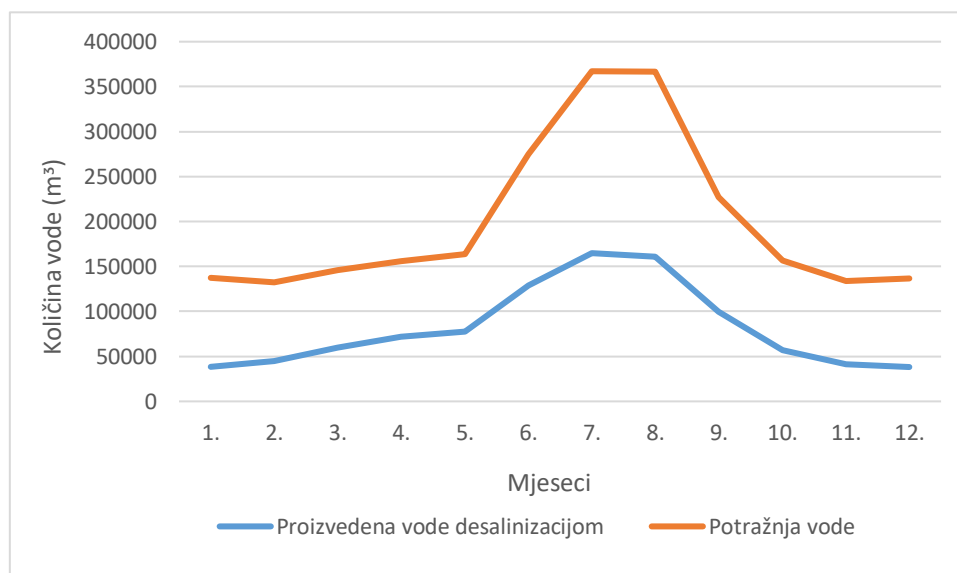
Tablica 6.2 Troškovi RO sustava

Komponenta	Cijena (€/m <sup>3</sup> /d)
RO moduli	56,91
Dodatna oprema	365,85
Dovod morske vode/uklanjanje koncentrata soli	81,30
Ugradnja	325,20
Ostali troškovi	113,82
Nepredvidljivi troškovi (5 % ukupne investicije)	48,79
<b>Ukupna početna investicija (preračunato u €/m<sup>3</sup>/d)</b>	<b>991,87</b>
	<b>Cijena (€/m<sup>3</sup>)</b>

Operativni troškovi i održavanje (godišnji)	0,24
---	------

Pod pojmom RO moduli se podrazumijevaju troškovi membrana i tlačnih posuda. Dodatna oprema podrazumijeva pumpe, uređaje za povećanje korisnosti sustava poput tlačnog izmjenjivača (eng. Pressure exchanger - PX) i drugih, sustav za tretman vode prije puštanja kroz membrane (filtracijski sustav i razne kemikalije za dezinfekciju i uklanjanje neželjenih sastojaka morske vode), elektronička oprema za regulaciju i napajanje itd. U ostale troškove ubrajamo transport, projektiranje i zakonske dozvole. Operativni troškovi i troškovi za održavanje se gledaju na razini godine, a u njih spadaju troškovi zamjena membrana, trošak kemikalija, uklanjanje otpada (koncentrata soli koji ostaju nakon odslanjivanja), osiguranja, radne snage i ostalih eksternih troškova. [36]

Potrošnja energije navedenog sustava iznosi  $4\text{kWh}/\text{m}^3$  [36], a za već određenu snagu plutajuće fotonaponske elektrane iznosa 5 MW dobivena je ukupna godišnja proizvodnja vode u iznosu od  $983.336,27\text{ m}^3$ . Ukupno potrošena voda na razini cijelog arhipelaga iznosi  $2.398.453,82\text{ m}^3$  [33], [34] u godini te usporedbom dvaju brojeva se dobiva udio pokrivenog zahtjeva za vodom u iznosu od 41 %. Graf 6.3 prikazuje usporedbu navedenih iznosa za svaki mjesec u godini.



Graf 6.3 Usporedba potražene i proizvedene količine vode

#### 6.4. Reverzibilna hidroelektrana

Već je objašnjeno kako će se RHE postrojenje gledati zasebno isključivo radi pojednostavljenja tehno-ekonomske analize hibridnog sustava, no ono bi se u budućnosti moglo koristiti u sinergiji sa FPV i RO sustavima pa je zbog toga i razmatrano. Lokacija gornjeg akumulacijskog jezera je već predstavljena i s njome bi visinska razlika između dvaju jezera iznosila 200 m. Prema potrebama zadatka, volumen jezera bio bi  $80000 \text{ m}^3$ , no  $10000 \text{ m}^3$  bi uvijek moralo ostati u jezeru kao osiguranje s obzirom da gornje akumulacijsko jezero ujedno služi kao spremnik za transport i distribuciju pitke vode prema potrošačima, stoga bi se preostalih  $70000 \text{ m}^3$  koristilo za cirkuliranje. Tijekom dnevnih sati kada je cijena električne energije veća, proizvodila bi se električna energija na generatoru i prodavala u mrežu, dok bi se u noćnim satima, kada je cijena električne energije niža, voda transportirala natrag u gornje akumulacijsko jezero. Zbog točnijeg izračuna, određeno je kako će protok u oba slučaja biti konstantan za svaki sat, odnosno kroz turbinu će prolaziti  $5000 \text{ m}^3/\text{h}$ , a pumpati će se  $7000 \text{ m}^3/\text{h}$ . Iz navedenoga su izračunate snage pumpe i turbine pomoću sljedećih jednadžbi:

$$P_t = \rho * g * H * Q_t * \eta_t * \eta_g \quad (1)$$

$$P_p = \frac{\rho * g * H * Q_p}{\eta_p * \eta_g} \quad (2)$$

Gdje su:

$P_t$  - snaga turbine, [W]

$P_p$  - snaga pumpe, [W]

$\rho$  - gustoća vode,  $\text{kg}/\text{m}^3$

$g$  - gravitacija,  $\text{m}/\text{s}^2$

$H$  - visinska razlika spremnika, m

$Q_t$  - volumenski protok kroz turbinu,  $\text{m}^3/\text{s}$

$Q_p$  - volumenski protok kroz pumpu,  $\text{m}^3/\text{s}$

$\eta_g$  – korisnost električnog generatora

$\eta_t$  – korisnost pumpe

$\eta_p$  – korisnost turbine



Prema [37], odabrani sustav bi imao efikasnost turbine 94 %, pumpe 92 %, te električnog generatora 99 %. Zanimajući linijske gubitke te množenjem jednadžbi (1) i (2) sa vremenom u kojem rade dobivamo proizvedenu električnu energiju iz turbine i električnu energiju koju je potrebno dovesti pumpi. Pumpa i turbina, kao i ostale komponente sustava, uzete su prema [37]. Iz Tablica 6.3 se mogu vidjeti cijene tih komponenti kao i ostali troškovi potrebni za ostvarivanje ovog sustava.

Tablica 6.3 Troškovi RHE sustava

Opis komponenti	Cijena (€)
Gornje akumulacijsko jezero	585.385,72
Dovod vode	177.019,54
Cjevovodi	522.547,81
Oprema za rad postrojenja (mehanička i električna)	1.958.131,96
Građevinski troškovi postrojenja	376.563,83
Dovod električne mreže i trafostanica	175.511,99
Dodatni građevinski troškovi	285.207,00
Ostali troškovi	2.709.871,58
<b>Ukupna početna investicija</b>	<b>6.878.904,76</b>
Troškovi upravljanja i održavanja (3 % ukupne investicije)	206.367,14
Veliki servis (svakih 15 godina)	687.890,48

Oprema za rad postrojenja se sastoji od pumpe, turbine, elemenata potrebnih za njihov rad (vratila, ležajevi i sl.), tehnologije koja se koristi za pogon i regulaciju, sigurnosnih sustava itd. Bitno je za naglasiti kako je u referentnom radu korištena reverzibilna turbina i napomenuto je da se odvajanjem pumpe i turbine kao zasebnih cjelina povećavaju troškovi za 30 % što je uračunato u ovoj analizi. U dodatne građevinske troškove se ubrajaju izgradnje tunela, cesta i ostalih građevinskih objekata potrebnih za pristup, održavanje i rad postrojenja. Pod ostalim troškovima se podrazumijevaju izrada studija, projektiranje, osiguranje, nepredvidljivi troškovi koji su zbog zahtjevnosti projekta visoki, razni troškovi koji nisu uračunati u opremu za rad postrojenja poput sustava za balansiranje vode, ventila, hidrauličkih instrumenata itd. [37]

## 6.5. Financijska i ekonomska analiza

Dio proizvedene energije iz fotonaponske elektrane se distribuira do sustava reverzne osmoze, a dio se prodaje u mrežu kao višak. S obzirom da RO sustav troši onoliko energije koliko mu FPV sustav dopušta, može se zaključiti kako odabirom konstante snage FPV sustava, zarada ovisi direktno o cijeni električne energije. Prilikom ekonomske analize korišten je jednostavni

dvotarifni model cijene prikazan u Tablica 6.4 iako bi za precizniju analizu trebale koristiti tržišne cijene. Dnevna tarifa traje od 7h-21h, a noćna od 21h-7h.

Tablica 6.4 Dvotarifni model cijena el. energije

Stavka	Cijena
Direktni trošak energije – Dnevna tarifa	77,56 €/MWh
Direktni trošak energije – Noćna tarifa	42,66 €/MWh
Trošak prijenosa i distribucije – Dnevna tarifa	18,52 €/MWh
Trošak prijenosa i distribucije – Noćna tarifa	9,26 €/MWh
Naknada za OIE	13,89 €/MWh
Ukupni trošak energije – Dnevne tarifa	124,27 €/MWh
Ukupni trošak energije – Noćna tarifa	74,37 €/MWh
Trošak maksimalno aktivirane snage (mjesečno)	3,44 €/kW

Osnovna cijena vode za arhipelag Cres-Lošinj prema [38] iznosi  $0,73 \text{ €/m}^3$ . Zarada RO sustava se gleda kao prodaja proizvedene vode te je također uračunata ušteda prilikom korištenja energije proizvedene iz FPV umjesto kupnje potrebne el. energije za rad RO sustava. Kod RHE se, kako je već prije naglašeno, profit ostvaruje razlikom prodane el. energije proizvedene tijekom dnevne te kupnjom el. energije tijekom noćne tarife. Pretpostavljeno je da je vlastita investicija jednaka 10 % ukupne investicije dok se ostatak potrebnog novca dobiva iz kredita. Kamatna stopa je uzeta u iznosu od 2,2 %, a pretpostavkom otplate kredita u iznosu od 20 godina izračunata je godišnja rata otplate. Moguće je financiranje dijela projekta pomoću bespovratnih sredstava, primjerice iz EU fondova, no to u ovom radu nije uzeto u obzir. U svakom poslovanju dolazi do trošenja dugotrajne imovine odnosno smanjenja njene vrijednosti tijekom vremena, a taj se proces naziva amortizacijom. Zadaća amortizacije je da se vrijednost imovine postepeno prenosi na troškove, tj. na vrijednost nove imovine tijekom određenog vremena. Za potrebe zadatka je uzeta stopa amortizacije u iznosu od 5 % početne investicije. Također je potrebno uračunati godišnji porez na dobitak u iznosu od 10 % i diskontnu stopu koja označava stopu pada vrijednosti novca tijekom godina, a ona se pretpostavlja u iznosu od 4 %.

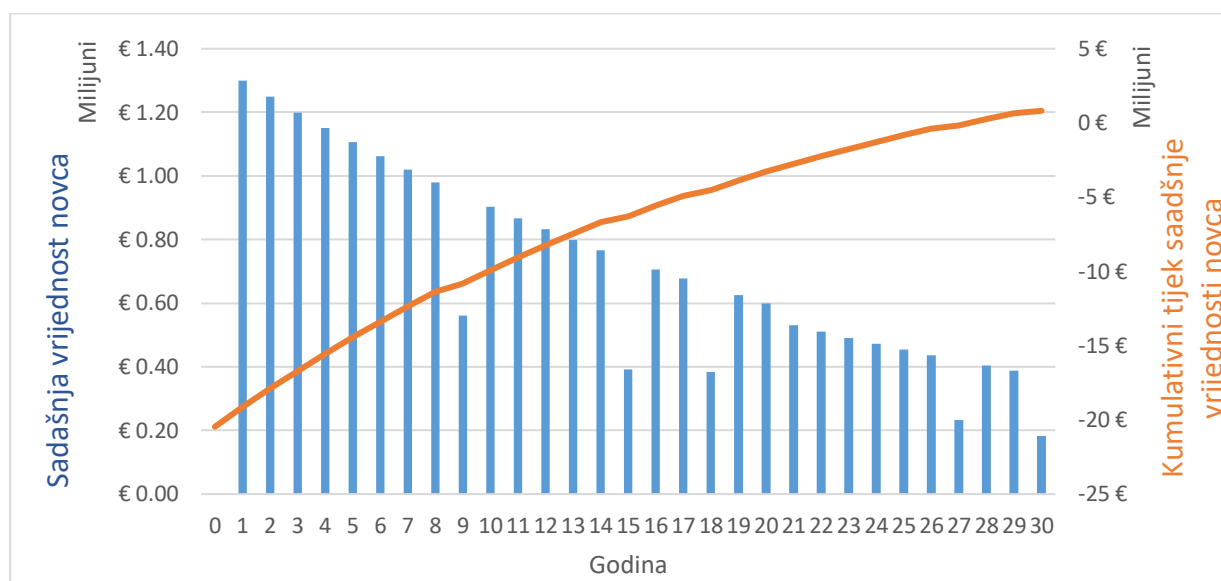
Uzimajući u obzir sve podatke navedene tijekom rada, izrađena je Tablica 6.5 svih komponentni potrebnih za računanje ekonomskog i financijskog tijeka novca u narednih 30 godina.

Tablica 6.5 Sve stavke potrebne za računanje ekonomskog i financijskog toka novca

Investicijski trošak FPV	5.650.000,00 €
Investicijski trošak RO	7.934.959,35 €
Investicijski trošak RHE	6.878.904,76 €
<b>Ukupni investicijski trošak</b>	<b>20.463.864,11 €</b>
Troškovi održavanja i upravljanja FPV	77.500,00 €
Troškovi održavanja i upravljanja RO	236.000,71 €
Troškovi održavanja i upravljanja RHE	206.367,14 €
<b>Ukupni troškovi održavanja i upravljanja</b>	<b>519.867,85 €</b>
Zarada FPV sustava (godišnje)	808.949,92 €
Zarada RO sustava (godišnje)	717.835,48 €
Zarada RHE sustava (godišnje)	336.753,77 €
<b>Ukupna zarada (godišnje)</b>	<b>1.863.539,17 €</b>
Veliki servis FPV (svakih 9 godina)	600.000,00 €
Veliki servis RHE (svakih 15 godina)	687.890,48 €
Vlastiti uloženi novac (10 % investicije)	2.046.386,41 €
Kredit	18.417.477,70 €
Kamatna stopa	2,20 %
Otplata kredita	20 godina
Amortizacija (5 % investicije)	1.023.193,21 €
Porez na dobit	10 %
Diskontna stopa	4 %

Na temelju navedenih podataka i izračunatog ekonomskog tijeka novca, dobivene su vrijednosti: neto sadašnja vrijednost novca (eng. Net present value – NPV) i unutarnja stopa povrata (eng. Internal rate of return – IRR). Navedene vrijednosti označavaju parametre isplativosti investicije. NPV je metoda procjenjivanja isplativosti investicije koja se temelji na činjenici kako će određena količina novca koji sada posjedujemo vrijediti manje u budućnosti zbog inflacije, kamatnih stopa i oportunitetnih troškova budući da se novac koji sada posjedujemo može ulagati i samim time i rasti. Korištenjem diskontne stope, kao stope pada vrijednosti novca, možemo svesti neto novčane tijekomove na sadašnje vrijednosti (eng. Present value- PV) i njihovom konačnom sumom, nakon oduzimanja inicijalne investicije, dobiva se NPV. Funkcija IRR označava najmanju diskontnu stopu koja se koristi kako bi se odredila isplativost projekta. Odnosno, ukoliko bi se IRR koristio kao diskontna stopa pri računanju sadašnje vrijednosti tijekomova novca, NPV bi bio jednak nuli. U ovom radu je NPV izračunat u iznosu od 813.939,58 € dok je IRR jednak 4,34 %. Graf 6.4 prikazuje godišnje neto tijekomove novca u obliku stupaca te kumulativni tijek u obliku linije. Iz grafa je vidljivo kako su vrijednosti sadašnjeg novca veće od neto sadašnje vrijednosti do 12. godine, a iza toga se bilježi

pad s iznimkom u 9. godini. Vidljivo je kako uz 9. godinu, odstupaju i 15., 18., 27., i 30. godina, a razlog tomu se troškovi velikih servisa sustava.



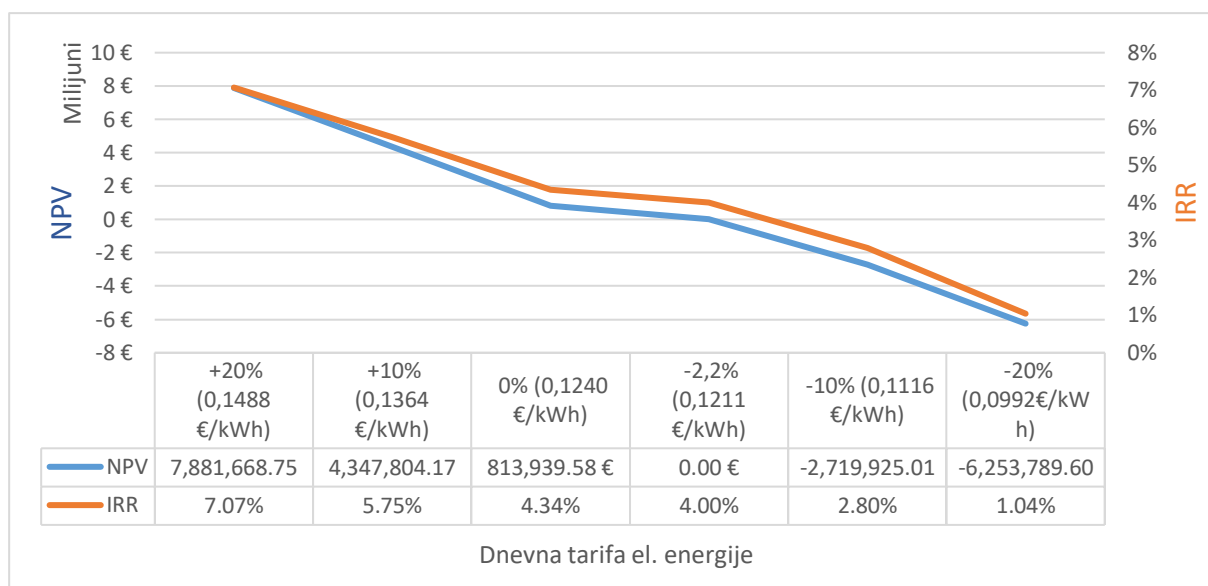
Graf 6.4 Usporedba sadašnje vrijednosti novca i kumulativnog tijeka sadašnje vrijednosti novca

## 6.6. Analiza osjetljivosti

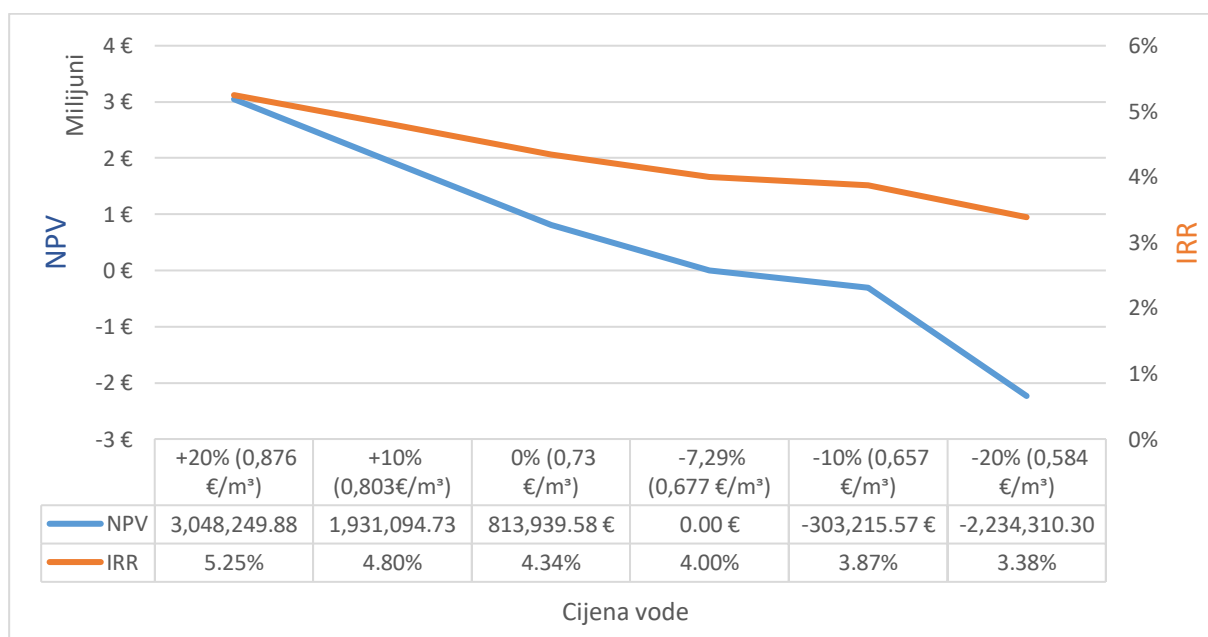
Prilikom mogućih promjena cijena el. energije i vode je potrebno provesti analizu osjetljivosti, odnosno, analizirati kako se mijenjaju parametri NPV i IRR povećanjem ili sniženjem navedenih cijena. Graf 6.4, Graf 6.5, Graf 6.6 prikazuju promjenu NPV i IRR vrijednosti u ovisnosti o promjeni cijena dnevne i noćne tarife te cijene vode.

Na Graf 6.5 može se primijetiti kako promjenom dnevne cijene električne energije na više vrijednosti, NPV ima neznatno brži rast od IRR-a, dok se snižavanjem cijena električne energije ostvaruje neznatno brži pad IRR-a u odnosu na NPV. Isto tako se može iščitati kako ukupna investicija uveliko ovisi o promijeni dnevne cijene električne energije jer se promjenom od -10 %, što označava promjenu od -0,0124 €/kWh, NPV se mijenja za -3.533.864,59 €.

Graf 6.6 prikazuje promjenu NPV-a i IRR-a u ovisnosti od cijene vode i vidljivo je kako se NPV brže mijenja od IRR-a bilo povećanjem ili smanjenjem cijene vode, no za razliku od prijašnjeg grafa, ovisnost promjene NPV-a od cijene vode nije tako značajno. Pri istom promjenom cijene vode od -10 %, NPV se mijenja za -1.117.155,15 €.



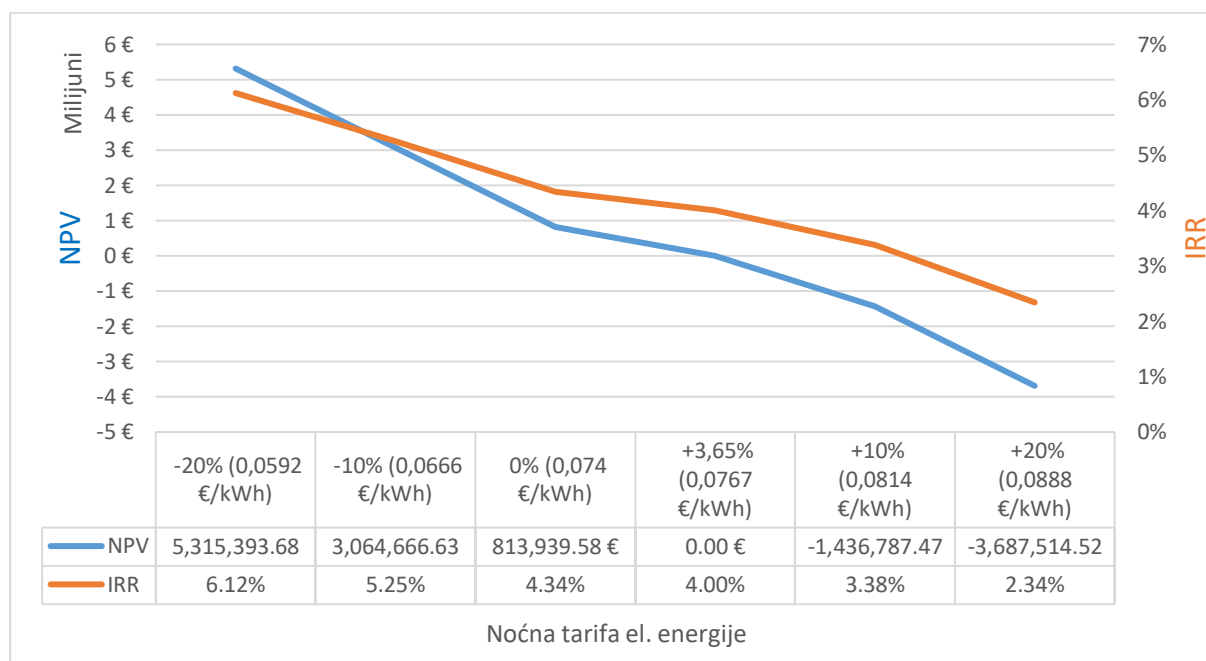
Graf 6.5 Promjena IRR-a i NPV-a u ovisnosti o dnevnoj tarifi el. energije



Graf 6.6 Promjena IRR-a i NPV-a u ovisnosti o cijeni vode

Graf 6.7 prikazuje promjenu NPV-a i IRR-a u ovisnosti od cijene noćne električne energije. Usporedbom prethodna dva grafa sa navedenim, vidljivo je kako se sniženjem cijene noćne električne energije zapravo povisuje vrijednost NPV-a i IRR-a. Razlog tomu je što se po ovoj cijeni kupuje električna energija potrebna za rad pumpe prilikom transporta vode u gornje

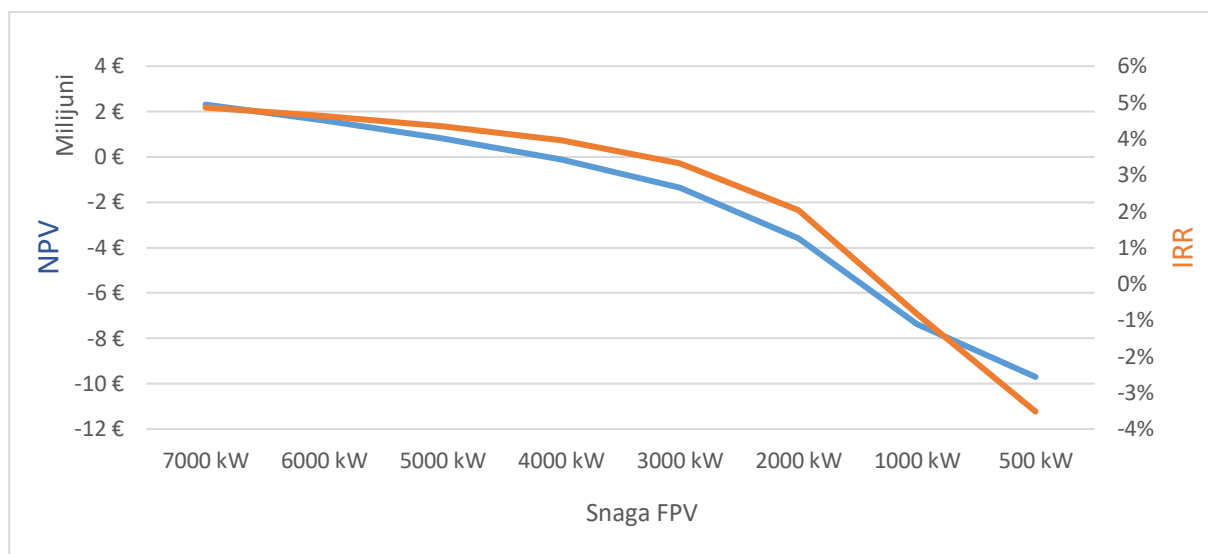
akumulacijsko jezero, stoga se sniženjem cijene električne energije snižava trošak, a samim time se povećavaju NPV i IRR. Također se može primijetiti kako se povećanjem noćne cijene električne energije ostvaruje brži pad NPV-a od IRR-a. Za sniženje cijene od -10 %, promjena NPV-a iznosi +2.250.727,05 €.



Graf 6.7 Promjena IRR-a i NPV-a u ovisnosti o noćnoj tarifi el. energije

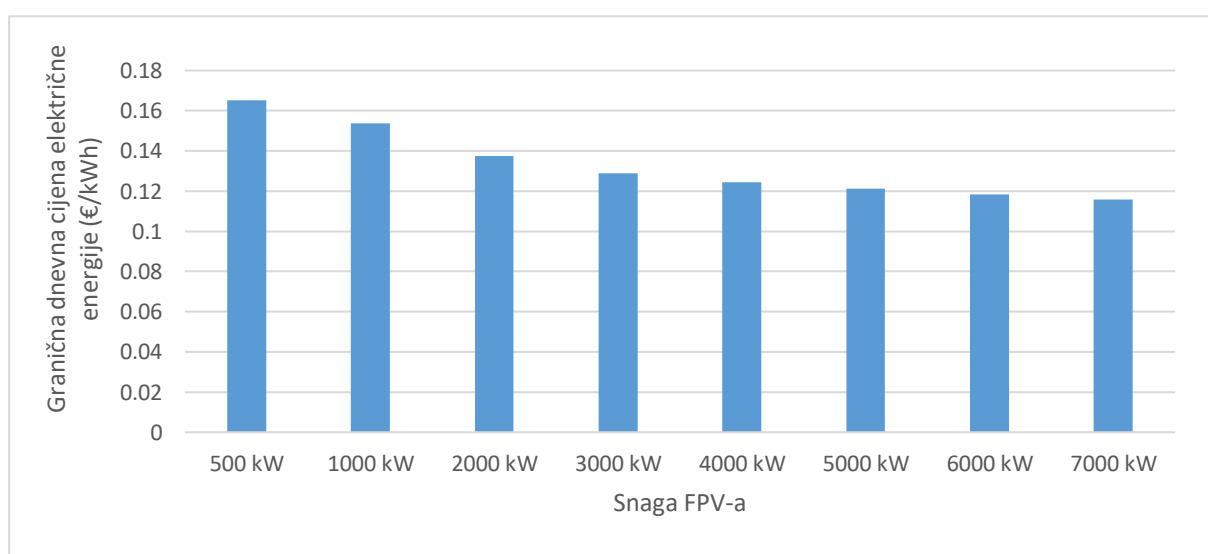
Iz navedenih grafova se može zaključiti kako na investiciju najviše utječe cijena el. energije dnevne tarife, zatim cijena el. energije noćne tarife i na kraju cijena vode. Također se mogu u svakome grafu primijetiti specifične cijene kod kojih je NPV jednak nuli, što označava najnižu granicu ispod koje NPV postaje negativan. Kod cijene električne energije taj je iznos jednak 0,1211 €/kWh za dnevnu i 0,0767 €/kWh za noćnu, dok kod cijene vode iznosi 0,677 €/m<sup>3</sup>.

Promatrano je i ponašanje NPV-a i IRR-a pri različito odabranim snagama plutajuće fotonaponske elektrane, što prikazuje Graf 6.8. NPV bilježi neznatno brži pad sve do snage od 2000 kW te se naknadnim sniženjem snage ostvaruje brži pad IRR-a. Također je izračunata vrijednost snage FPV-a pri kojoj će NPV biti 0, a ona iznosi 4104,46 kW. Odnosno ugradnjom FPV-a niže snage od navedene se ostvaruje negativan NPV.



Graf 6.8 Promjena IRR-a i NPV-a u ovisnosti o snazi FPV-a

Za odabrane snage FPV sustava postoje određene granične dnevne cijene električne energije pri kojima je NPV jednak nuli. Graf 6.9 prikazuje minimalno potrebne dnevne cijene električne energije pri kojima je projekt i dalje isplativ za odabrane snage sustava. Može se iščitati kako je postepenim povećanjem snage sustava, smanjenje granične cijene dnevne električne energije sve manje. Tako je, primjerice, prilikom povišenja snage s 500 kW na 1000 kW, razlika granične cijene dvaju sustava 0,0115 €/kWh, dok se povišenjem snage sustava s 6000 kW na 7000 kW ostvaruje razlika od 0,0025 €/kWh.



Graf 6.9 Usporedba minimalne potrebne dnevne cijene električne energije za različite snage FPV sustava

## 7. ZAKLJUČAK

U okviru zadatka je bilo potrebno prikazati mogućnosti hibridnog postrojenja sustava desalinizacije, plutajuće fotonaponske elektrane i reverzibilne hidroelektrane te analizirati njegovu primjenu na otoku Cresu. Zbog mnogih prednosti sustava pojedinačno i dodatnih prednosti proizašlih njihovim integriranjem u cjeloviti sustav, navedeno hibridno postrojenje je poželjno ugraditi na svakom otoku koji nema vlastite izvore energije i koji nema izvore pitke vode ili su ograničeni. Otoci bi ipak morali ispunjavati geološke, tehno-ekonomske i okolišne kriterije koji predstavljaju prepreku većini za realizaciju ovakvog projekta. Potreban je brdoviti reljef za ostvarivanje dovoljne visinske razlike među spremnicima RHE, a poželjno je i kako otok već sadrži potencijalni spremnik u obliku jezera. Određena lokacija za postavljanje spremnika mora biti lako pristupačna, što zbog lakšeg upravljanja i održavanja, tako i zbog lakšeg dovoda vode iz desalinizacijskog sustava. Jedan od spremnika mora imati dovoljno veliku površinu za postavljanje FPV sustava, a postavljeni FPV sustav mora dobivati dovoljnu količinu sunčevog zračenja. Ispunjavajući zadane kriterije, otok Cres se nametnuo kao potencijalna lokacija za ostvarivanje navedenog postrojenja. Bitno je još napomenuti kako je, za potrebe ovog zadatka, s relevantnim stručnjacima potrebno dodatno ispitati utjecaj visokofiltrirane vode na ekosustav Vranskog jezera. Poslije ispunjavanja geoloških, okolišnih i tehničkih kriterija, provedena je financijska i ekonomska analiza kako bi se prikazala isplativost projekta, odnosno mogućnost njegova ostvarivanja. Parametri korišteni za ispitivanje isplativosti su NPV koji iznosi 813.939,58 € i IRR kojemu je vrijednost 4,34 %, a dokle god je NPV veći od nule i IRR veći od diskontne stope, projekt se smatra isplativim. Ti parametri najviše ovise o cijeni dnevne električne energije, koja će se sigurno mijenjati s obzirom na trajanje projekta od 30 godina, a manje od cijene vode i cijene noćne električne energije. Uzimajući to u obzir, izračunata je cijena dnevne električne energije koja predstavlja svojevrsnu graničnu cijenu ispod koje će NPV postati negativan i time prouzročiti gubitak uloženog novca, a iznosi 0,121 €/kWh. Postavljena analiza se zasniva na odabiru snage FPV sustava od 5000 kW tako da je izračunata i najmanja snaga sustava pri kojoj će NPV biti nula u iznosu od 4104,46 kW, a to je također izračunato pod pretpostavkom konstantne vrijednosti ostalih parametara, točnije cijena električne energije i vode. S ekonomske strane, projekt je u odabranom slučaju isplativ, ali bitnije za naglasiti je kako bi svojom realizacijom omogućio dodatna ulaganja u slične sustave što bi na poslijetku dovelo do energetske i vodom neovisnog otoka. U takav status je, gledano dugoročno, itekako isplativo ulagati.



**LITERATURA**

- [1] “IEA-International Energy Agency, Hydropower”, Accessed: Feb. 07, 2023. [Online]. Available: <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/hydropower>
- [2] H. Rabiee, K. R. Khalilpour, J. M. Betts, and N. Tapper, “Energy-water nexus: Renewable-integrated hybridized desalination systems,” in *Polygeneration with Polystorage: For Chemical and Energy Hubs*, Elsevier, 2018, pp. 409–458. doi: 10.1016/B978-0-12-813306-4.00013-6.
- [3] “Total dissolved solids in Drinking-water Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality,” 2003.
- [4] D. Mugisidi and O. Heriyani, “Sea Water Characterization at Ujung Kulon Coastal Depth as Raw Water Source for Desalination and Potential Energy,” in *E3S Web of Conferences*, Feb. 2018, vol. 31. doi: 10.1051/e3sconf/20183102005.
- [5] M. A. Abdelkareem, M. el Haj Assad, E. T. Sayed, and B. Soudan, “Recent progress in the use of renewable energy sources to power water desalination plants,” *Desalination*, vol. 435. Elsevier B.V., pp. 97–113, Jun. 01, 2018. doi: 10.1016/j.desal.2017.11.018.
- [6] A. Al-Karaghoul, D. Renne, and L. L. Kazmerski, “Solar and wind opportunities for water desalination in the Arab regions,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 9. pp. 2397–2407, Dec. 2009. doi: 10.1016/j.rser.2008.05.007.
- [7] “Završni rad - Tehnologija desalinizacije korištenjem solarne i vjetroelektrane, Filipović Ivona”, Accessed: Feb. 05, 2023. [Online]. Available: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://zir.nsk.hr/islandora/object/fkit:90/preview>
- [8] “Zakon o energiji.” [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2001\\_07\\_68\\_1120.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2001_07_68_1120.html) (accessed Feb. 05, 2023).
- [9] “Energija u Hrvatskoj”, Accessed: Feb. 20, 2023. [Online]. Available: [https://eihp.hr/wp-content/uploads/2023/01/Energija%20u%20HR%202021\\_WEB\\_LR.pdf](https://eihp.hr/wp-content/uploads/2023/01/Energija%20u%20HR%202021_WEB_LR.pdf)
- [10] S. Gadzanku, H. Mirletz, N. Lee, J. Daw, and A. Warren, “Benefits and critical knowledge gaps in determining the role of floating photovoltaics in the energy-water-food nexus,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 13, no. 8, Apr. 2021, doi: 10.3390/su13084317.
- [11] “Erotricity”, Accessed: Feb. 05, 2023. [Online]. Available: <http://aerotricty.net/news/innovative-cover-with-pv-foil-for-the-cyprus-water-development-department/>
- [12] “Edge Technology”, Accessed: Feb. 05, 2023. [Online]. Available: <http://www.floating-solar.com/technologies.html>
- [13] M. Kumar, H. Mohammed Niyaz, and R. Gupta, “Challenges and opportunities towards the development of floating photovoltaic systems,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 233. Elsevier B.V., Dec. 01, 2021. doi: 10.1016/j.solmat.2021.111408.
- [14] “Seetao”, Accessed: Feb. 07, 2023. [Online]. Available: <https://www.seetao.com/details/143660.html>
- [15] “YSG Solar”, Accessed: Feb. 07, 2023. [Online]. Available: <https://www.ysgsolar.com/blog/5-largest-floating-solar-farms-world-2022-ysg-solar>
- [16] “Power Technology”, Accessed: Feb. 07, 2023. [Online]. Available: <https://www.power-technology.com/marketdata/sekdoorn-solar-pv-park-netherlands/>

- [17] “Inter Solar”, Accessed: Feb. 07, 2023. [Online]. Available: <https://www.intersolar.de/market-trends/floating-pv-europe>
- [18] “PV Tech”, Accessed: Feb. 07, 2023. [Online]. Available: <https://www.pv-tech.org/dnv-bids-to-standardise-fpv-development-through-new-joint-industry-projects/>
- [19] “Forbes”, Accessed: Feb. 07, 2023. [Online]. Available: <https://www.forbes.com/sites/emanuelabarbiroglio/2019/11/07/a-new-floating-solar-farm-shows-that-renewables-can-be-easy/?sh=5d2f7d067930>
- [20] “International, The News”, Accessed: Feb. 07, 2023. [Online]. Available: <https://www.thenews.com.pk/print/466148-the-world-s-10-largest-hydro-electric-dams>
- [21] “Entura”, Accessed: Feb. 08, 2023. [Online]. Available: <https://www.entura.com.au/is-pumped-storage-hydro-the-key-to-increasing-renewables-in-australia/>
- [22] “Završni rad - Uloga reverzibilne hidroelektrane u elektroenergetskom sustavu”, Accessed: Feb. 20, 2023. [Online]. Available: [file:///C:/Users/User/Downloads/uloga\\_reverzibilne\\_hidroelektrane\\_u\\_elektroenergetskom\\_sustavu\\_srsa.pdf](file:///C:/Users/User/Downloads/uloga_reverzibilne_hidroelektrane_u_elektroenergetskom_sustavu_srsa.pdf)
- [23] “Clean Technica”, Accessed: Feb. 08, 2023. [Online]. Available: <https://cleantechnica.com/2022/01/04/largest-pumped-hydro-facility-in-world-turns-on-in-china/>
- [24] “NS Energy”, Accessed: Feb. 08, 2023. [Online]. Available: <https://www.nsenergybusiness.com/projects/cortes-la-muela-power-complex/>
- [25] “Integration of PV floating with hydroelectric power plants”.
- [26] “HelioRec”, Accessed: Feb. 08, 2023. [Online]. Available: <https://www.heliorec.com/post/hybrid-hydropower-and-fpv>
- [27] “PV Magazine”, Accessed: Feb. 08, 2023. [Online]. Available: <https://www.pv-magazine.com/2022/07/12/worlds-largest-hybrid-hydropower-photovoltaic-station/>
- [28] “Offshore Energy”, Accessed: Feb. 08, 2023. [Online]. Available: <https://www.offshore-energy.biz/worlds-largest-hydro-floating-solar-hybrid-comes-online-in-thailand/>
- [29] “EDP Renewables”, Accessed: Feb. 08, 2023. [Online]. Available: <https://www.edpr.com/en/news/2022/07/15/edps-pioneer-floating-solar-power-plant-portugal-ready-start-producing-energy>
- [30] “Vodoopskrba i odvodnja Cres Mali Lošinj d.o.o.”, Accessed: Feb. 10, 2023. [Online]. Available: <http://www.viocl.hr/djelatnosti/vodoopskrba/vodoopskrbni-sustav-2>
- [31] “EKOLOŠKI OTISAK CESTOVNOG PROMETA NA CRESKO-LOŠINJSKOM ARHIPELAGU”, Accessed: Feb. 20, 2023. [Online]. Available: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://hrcak.srce.hr/file/93540>
- [32] “Završni rad - Energetsko planiranje pametnog otoka Cresa”, Accessed: Feb. 20, 2023. [Online]. Available: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://zir.nsk.hr/islandora/object/fsb%3A5261/datastream/PDF/view>
- [33] “Projekt OESKEP - Osiguranje električne energije u slučaju klimatskih ekstrema i prirodnih katastrofa”.
- [34] “Projekt INSULAE - Maximizing the impact of innovative energy approaches in the EU islands”.
- [35] “Podaci dobiveni od strane mentora”.
- [36] M. Kettani and P. Bandelier, “Techno-economic assessment of solar energy coupling with large-scale desalination plant: The case of Morocco Techno-economic assessment

- of solar energy coupling with large-scale desalination plant,” vol. 494, p. 114627, 2020, doi: 10.1016/j.desal.2020.114627i.
- [37] “PUMPED HYDRO COST MODELLING,” 2018. Accessed: Feb. 20, 2023. [Online]. Available: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.aemo.com.au/-/media/Files/Electricity/NEM/Planning\_and\_Forecasting/Inputs-Assumptions-Methodologies/2019/Report-Pumped-Hydro-Cost-Modelling.pdf
- [38] “ODLUKA-O-CIJENI-VODNIH-USLUGA\_novo\_2022”, Accessed: Feb. 20, 2023. [Online]. Available: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://www.viocl.hr/wp-content/uploads/2022/09/ODLUKA-O-CIJENI-VODNIH-USLUGA\_novo\_2022.pdf