

Analiza proizvodnje energije hibridnog sustava reverzibilne hidroelektrane i plutajuće fotonaponske elektrane

Mihaljević, Klara

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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:235:929861>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-09**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Klara Mihaljević

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

**Analiza proizvodnje energije
hibridnog sustava reverzibilne
hidroelektrane i plutajuće
fotonaponske elektrane**

Mentor:

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

Student:

Klara Mihaljević

Zagreb, 2022.

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

Klara Mihaljević

ZAHVALE

Zahvaljujem se svom mentoru izv. prof. dr. sc. Goranu Krajačiću na pomoći, dostupnosti i uloženom vremenu koje mi je pružio tijekom izrade ovog rada.

Zahvaljujem se i asistentu Goranu Stunjeku na savjetima, pomoći, uloženom vremenu i prenesenom znanju za vrijeme pisanja diplomskog rada i za vrijeme diplomskog studija.

Zahvaljujem se projektu „Osiguranje električne energije u slučaju klimatskih ekstrema i prirodnih katastrofa“ financiran iz Europskog fonda za regionalni razvoj i projektu INSULAE financiran iz programa Obzor 2020 za ustupljene podatke.

Zahvaljujem se svojim roditeljima koji su podrškom i razumijevanjem bili uz mene tijekom moga školovanja. Zahvaljujem se i svojim prijateljima koji su bili uz mene (bez vas Četvrtak ne bi bio isti).

Klara Mihaljević



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 22 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 22 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Klara Mihaljević** JMBAG: 0035207459

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza proizvodnje energije hibridnog sustava reverzibilne hidroelektrane i plutajuće fotonaponske elektrane**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Analysis of a hybrid system operation based on pumped-storage hydropower and floating photovoltaic power plant**

Opis zadatka:

Reverzibilne hidroelektrane predstavljaju preko 10% ukupnog hidroenergetskog kapaciteta u svijetu i 94% globalno instaliranog kapaciteta za skladištenje energije. Reverzibilne hidroelektrane omogućuju aktivno skladištenje viška energije iz mreže, što ih čini korisnim izvorom fleksibilnosti u elektroenergetskom sustavu. Prijelaz na obnovljive izvore energije, posebice energiju vjetra i sunca, zahtijeva povećanu fleksibilnost energetskih sustava. Proizvodnja iz vjetra i sunca je intermitentna i ima sezonske varijacije, što rezultira povećanom potrebom za skladištenjem kako bi se jamčilo da se potražnja može zadovoljiti u bilo kojem trenutku. Inovativni rad reverzibilne hidroelektrane i komplementarnost s drugim tehnologijama za proizvodnju energije nude velike mogućnosti za integraciju varijabilnih obnovljivih izvora energije. Primjena plutajućih fotonaponskih panela sve češće je promatrano rješenje prilikom razmatranja hibridnog vodenja sustava baziranog na hidroenergiji i drugim varijabilnim obnovljivim izvorima energije. Plutajući fotonaponski sustavi mogu se instalirati na gornju i/ili donju akumulaciju, stvarajući hibridni model koji pruža prednosti povećanja efikasnosti iskorištavanja zemljišnih i vodnih resursa, smanjenje ishlapljivanja vode, povećanje efikasnosti fotonaponskih panela zbog efekta hlađenja, korištenje postojeće visokonaponske infrastrukture itd.

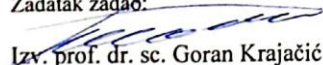
U okviru diplomskog rada potrebno je analizirati proizvodnju energije hibridnog sustava reverzibilne hidroelektrane i plutajuće fotonaponske elektrane te definirati proizvodne kapacitete ovisne o promatranim scenarijima.


U okviru diplomskog rada potrebno je:

1. Napraviti pregled literature na temu korištenja tehnologije reverzibilnih hidroelektrana i plutajućih fotonaponskih elektrana
2. Napraviti pregled literature na temu hibridizacije sustava baziranog na hidroenergiji i plutajućim fotonaponskim sustavima te jasno definirati prednosti i mane predloženog rješenja
3. Analizirati rad hibridnog sustava hidroelektrane i plutajuće fotonaponske elektrane za odabranu lokaciju te prikazati proizvodnju energije promatranog hibridnog sustava. Za odabrane kapacitete sustava potrebno je kreirati jednostavnu tehno-ekonomsku analizu.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan: Datum predaje rada: Predviđeni datumi obrane:
5. svibnja 2022. 7. srpnja 2022. 18. – 22. srpnja 2022.

Zadatak zadao:

Izv. prof. dr. sc. Goran Krajačić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

SADRŽAJ.....	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS GRAFOVA	V
POPIS OZNAKA.....	VI
POPIS KRATICA	VIII
SAŽETAK.....	IX
SUMMARY	X
1. UVOD	1
2. SUSTAVI HIDROELEKTRANA	4
2.1. Općenito o hidroelektranama.....	4
2.2. Prednosti i mane hidroelektrana.....	8
2.3. SWOT analiza hidroelektrana	12
2.4. Hidroelektrane u svijetu	15
2.5. Hidroelektrane u Republici Hrvatskoj.....	19
2.5.1. Hidroelektrane u slivu rijeke Drave	20
2.5.2. Hidroelektrane u slivu rijeke Kupe	21
2.5.3. Hidroenergetski sustav (HES) u slivu rijeka Lokvarke i Ličanke	21
2.5.4. Hidroelektrana na Rječini	22
2.5.5. Hidroenergetski sustav u slivu rijeka Lika i Gacka	22
2.5.6. Hidroenergetski sustav u slivu rijeke Krke.....	23
2.5.7. Hidroenergetski sustav u slivu rijeke Cetine	23
2.5.8. Hidroenergetski sustav u slivu rijeke Trebišnjice	24
2.6. Male hidroelektrane u Republici Hrvatskoj	24
2.7. Opis odabrane hidroelektrane u Hrvatskoj – RHE Velebit	25
2.7.1. SWOT analiza reverzibilne hidroelektrane	29
3. ANALIZA TEHNOLOGIJA U HIBRIDNOM SUSTAVU	31
3.1. Hibridizacija RHE i vjetroelektrane	31
3.2. Hibridizacija RHE, vjetroelektrane i solarne elektrane	31
3.3. Tehnologija FPV.....	32
3.4. Tehnologija plutajućih solarnih panela (FPV)	33
3.4.1. Izvedbe projekta postavljanja plutajućih solarnih panela	36
3.5. Hibridizacija reverzibilne hidroelektrane i plutajuće solarne elektrane	43

4. OPIS KORIŠTENE METODE	44
<i>Model proizvodnje električne energije</i>	46
<i>Model pumpe</i>	47
<i>Model sustav FPV</i>	48
<i>Model ishlapljivanja jezera</i>	49
<i>Model napunjenost spremnika</i>	52
<i>Binarne varijable</i>	54
<i>Funkcija cilja</i>	54
5. REZULTATI I DISKUSIJA	57
5.1. Odabir optimalnog rješenja	57
5.2. Analiza dobivenih rezultata za hibridni sustav pri optimalnom kutu - P1, P2, P3	59
5.3. Grafička usporedba rada P1, P2 i P3 za RHE Velebit	65
5.4. Analiza stanja napunjenosti jezera Štikada	67
5.5. Analiza osjetljivosti promjene cijene sustava FPV	71
5.6. Analiza ishlapljivanja jezera Štikada	73
6. ZAKLJUČAK	76
LITERATURA	78

POPIS SLIKA

Slika 1. Prikaz reverzibilne hidroelektrane [7].....	2
Slika 2. Proizvodnja stakleničkih plinova [13].....	10
Slika 3. Riblji prolaz na rijeci Columbia [14]	12
Slika 4. Pogled odozgo na hidroelektranu Tri klanca (dio kontrole poplava) [18]	17
Slika 5. Hidroelektrane u Republici Hrvatskoj [25]	19
Slika 6. Obitelj Šupuk, Vjekoslav Meichsner i suradnici kod generatora u HE Krka (Jaruga 1) [26]	20
Slika 7. Pregledna situacija postrojenja RHE Velebit [3]	26
Slika 8. Uzdužni presjek postrojenja RHE Velebit [3].....	27
Slika 9. Primjer hibridnog sustava RHE, vjetroelektrane i solarne elektrane [36].....	32
Slika 10. Pontonska konstrukcija sustava FPV [40].....	40
Slika 11. Shematski prikaz FPV sustav postavljenog na vodenoj površini [41]	41
Slika 12. Potopljeni sustav FPV [42]	41
Slika 13. Skica i formula izračuna sile u užetu za privezivanje [38].....	42
Slika 14. Shematski prikaz modela	44
Slika 15. Prikaz sustava FPV [44].....	50

POPIS TABLICA

Tablica 1. Prednosti i mane sustava hidroelektrane	9
Tablica 2. Utjecaj najvažnijih faktora na izgradnju hidroelektrane [11]	13
Tablica 3. SWOT analiza hidroelektrane	15
Tablica 4. Osnovni podatci o hidroelektranama u slivu rijeke Drave [3].....	21
Tablica 5. Osnovni podatci o hidroelektranama u slivu rijeke Kupe [3].....	21
Tablica 6. Osnovni podatci o HES-u u slivu rijeka Lokvarke i Ličanke [3]	22
Tablica 7. Osnovni podatci o HES-u u slivu rijeka Lika i Gacka [3].....	22
Tablica 8. Osnovni podatci o HES-u u slivu rijeke Krke [3]	23
Tablica 9. Osnovni podatci o HES-u u slivu rijeke Cetine [3]	23
Tablica 10. Osnovni podatci o HES-u u slivu rijeke Trebišnjice [3].....	24
Tablica 11. Male hidroelektrane u Republici Hrvatskoj [31]	24
Tablica 12. Osnovni tehnički podatci RHE Velebit [3].....	28
Tablica 13. SWOT analiza RHE	29
Tablica 14. SWOT analiza osnovnih karakteristika hibridnih sustava sa plutajućim solarnim panelima	34
Tablica 15. Dobiveni rezultati prema pretpostavljenim tezama vezanim za hibridne sustave [37]	35
Tablica 16. Tablica parametara utjecaja kod konceptualne faze [38]	37
Tablica 17. Pregled članova jednadžbi	45
Tablica 18. Usporedni elementi rada sustava P1 i P2.....	63
Tablica 19. Prosječni ishlapljeni volumen jezera Štikada	74

POPIS GRAFOVA

Graf 1. Proizvodnja hidroelektrana u Net Zero scenariju 2000. - 2030. godina [10].....	4
Graf 2. Proizvodnja električne energije s niskim udjelom ugljika po tehnologiji i udjeli u globalnoj opskrbi električnom energijom, u 2020. godini [11].....	5
Graf 3. Investicijski troškovi kod velikih hidroelektrana [11]	7
Graf 4. Investicijski troškovi kod malih hidroelektrana ² [11]	7
Graf 5. Globalno povećanje neto hidroenergetskih kapaciteta vodećih zemalja, 2021.-2030. godine [11]	16
Graf 6. Horizontalno sunčevo zračenje na Vranskom jezeru, otok Cres [39]	39
Graf 7. Odabir optimalnog rješenja	58
Graf 8. Iznos funkcije cilja pri optimalnom nagibu.....	59
Graf 9. Rad pumpe - P1.....	60
Graf 10. Raspodjela električne energije proizvedene iz sustava FPV	61
Graf 11. Proizvodnja električne energije RHE Velebit P1	62
Graf 12. Prosječni dnevni izmijenjeni (engl. trade) volumen energije za 2021. godinu na burzi energije [49]	62
Graf 13. Rad pumpe - P2.....	64
Graf 14. Proizvedena energija sustav FPV	64
Graf 15. Rad pumpe - P3.....	65
Graf 16. Proizvedena električne energije u RHE Velebit.....	66
Graf 17. Potrebna električne energije u RHE Velebit za rad pumpe.....	67
Graf 18. Stanje napunjenosti jezera Štikada.....	69
Graf 19. Prikaz vrijednosti dosegnutih unutar intervala.....	70
Graf 20. Energija uskladištena u jezeru Štikada - prema stanju napunjenosti.....	70
Graf 21. Cijena sustava FPV [48].....	71
Graf 22. Analiza osjetljivosti - promjena cijene sustava FPV - P1	72
Graf 23. Analiza osjetljivosti - promjena cijene sustava FPV - P2	73
Graf 24. Satno ishlapljivanje jezera Štikada.....	74
Graf 25. Odnos prekrivene površine i ušteda od ishlapljivanja.....	75

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
V_{lake}	m^3	Volumen jezera [1]
$V_{lake_{min}}$	m^3	Minimalni volumen jezera
$V_{lake_{max}}$	m^3	Maksimalni volumen jezera
A_{lake}	m^2	Površina jezera [1]
c_{sak1}	kWh/m^3	Srednji energetske koeficijent – turbina
c_{sak2}	kWh/m^3	Srednji energetske koeficijent – pumpa
V_{up1}	m^3/h	Volumen pritoka i otoka gornjeg jezera
$A_{PV_{inst\ max}}$	m^2	Maksimalna površina instalacije – FPV
A_{pv}	m^2	Površina odabranog fotonaponskog modula [2]
$k_{FPV_{uk}}$	/	Koeficijent za potrebe instalacije
P_{panel}	kWp	Izlazna snaga solarnog panela [2]
p	kWp/m^2	Omjer snage solarnog panela i površine solarnog panela
Sp	kW	Maksimalna snaga pumpe [3]
St	kW	Maksimalna snaga turbine [3]
C_{tp}	EUR/kWh	Veleprodajna cijena električne energije (<i>podatci dobiveni od mentora</i>)
C_{tk}	EUR/kWh	Maloprodajna cijena električne energije (<i>podatci dobiveni od mentora</i>)
Max_{hours}	h	Maksimalni broj sati rada sustava
$Epvp$	Wh/kWp	Proizvedena električna energija po snazi panela
E_H	kWh	Proizvedena električna energija
V_t	m^3/h	Protok vode kroz turbinu
$V_{turbina}$	m^3/h	Maksimalni protok vode kroz turbinu
E_p	kWh	Električna energija potrebna za rad pumpe
V_p	m^3/h	Protok vode kroz pumpu
V_{pumpa}	m^3/h	Maksimalni protok vode kroz pumpu
E_{Pg}	kWh	Električna energija potrebna za rad pumpe – preuzeta iz mreže

E_{PPV}	kWh	Električna energija potrebna za rad pumpe – preuzeta iz sustava FPV
E_{PV}	kWh	Električna energija proizvedena u sustavu FPV
E_{PVg}	kWh	Električna energija iz sustava FPV predana u mrežu
E_{PVcap}	kWh	Kapacitet sustava FPV
k_{evp}	mm/h	Satni gubitci zbog ishlapljivanja
N		Koeficijent jezera Štikada vezan uz procjenu ishlapljivanja
u_2	m/s	Brzina vjetra
es	kPa	Tlak zasićene pare na površini jezera
ea	kPa	Tlak zasićene pare u zraku
T	°C	Temperatura zraka
RH	%	Relativna vlažnost
A_{FPVuk}	m ²	Ukupna instalacijska površina sustava FPV
V_{evapPV}	m ³	Prikazuje satni volumen koji ishlapi na promatranoj površini
$V_{evapbazno}$	m ³	Ishlapljeni volumen jezera na instalacijskoj površini bez sustava FPV
$V_{ušteta}$	m ³	Ukupna ušteta neishlapljivoga volumena na promatranoj površini
V_{spill}	m ³	Višak vode u jezeru
V_{up1}	m ³	Volumen pritoka i odtoka gornjeg jezera
C_{FPV}	EUR/kW	Investicija sustava FPV
CR		Povrat kapitala (engl. <i>Capital recovery</i>)
$invest_{year}$	god	Broj godina ulaganja
$disc_{rate}$	%	Diskontna stopa
C_w	EUR/m ³	Cijena vode

POPIS KRATICA

OIE	Obnovljivi izvor energije
EES	Elektroenergetski Sustav
RHE	Reverzibilna hidroelektrana
HE	Hidroelektrana
LCOE	Nivelirani troškovi električne energije (engl. <i>Levelized cost of energy</i> – LCOE)
HES	Hydroenergetski sustav
CHE	Crpna hidroelektrana
FPV	Tehnologija plutajućih solarnih panela (engl. <i>Floating solar panels</i> – FPV)
PVGIS	Photovoltaic Geographical Information System
HRK	Hrvatska kuna

SAŽETAK

Plutajuće solarne elektrane predstavljaju novu tehnologiju koja se unazad par godina intenzivno razvija. Povezivanjem plutajućih solarnih elektrana sa reverzibilnim hidroelektranama ostvaruje se hibridni sustav kojim se ostvaruju nove prednosti korištenja ovih tehnologija. U ovom radu predložen je hibridni sustav plutajuće solarne elektrane i reverzibilne hidroelektrane Velebit. Prema postavljenim uvjetima procijenjen je potencijal hibridnog sustava u proizvodnji električne energije i očuvanju vodenih resursa. Za potrebe rada razvijen je optimizacijski model koji za cilj ima maksimizaciju funkcije cilja. Prema rezultatima procijenjene su i druge prednosti hibridnog sustava. Prednosti razmatrane u ovom radu su smanjenje ishlapljivanje vodene površine jezera Štikada, mogućnost skladištenja energije i mogućnost poboljšanja već postojećeg sustava. Napravljena je tehno – ekonomska analiza sustava, analiza mogućnosti skladištenja energije i analiza očuvanja vodnih resursa. Analize se temeljen prema tri varijacije funkcije cilja. Glavna razlika između scenarija predstavlja financijski model baziran na trgovanju električnom energijom. Rezultati su pokazali isplativost hibridnog sustava na lokaciji uz pozitivan utjecaj na očuvanje vodnih resursa na lokaciji.

Ključne riječi:

Reverzibilne hidroelektrane, RHE, plutajuće solarne elektrane, FPV, nove tehnologije, hibridni sustavi, SWOT analiza, obnovljivi izvori energije

SUMMARY

Floating solar power plants represent a new technology that has been intensively developing in the past few years. The integration of floating solar power plants with pumped storage hydropower plants results in a hybrid system. By merging these technologies, new advantages and opportunities can be studied. In this paper, a hybrid system of floating solar power plant and pumped storage hydropower plant Velebit is discussed. According to the set conditions, the potential of the hybrid system in the production of electricity and the preservation of water resources is assessed. The purpose of this paper, an optimization model was developed, which aims to maximize the objective function. Based on the results, other advantages of the hybrid system were also evaluated. The advantages considered in this paper are the reduction of the evaporation of the water surface of Lake Štikada, the possibility of energy storage, and the possibility of improving the already existing system. For a better understanding of the model results, a techno-economic analysis of the system, an analysis of the possibility of energy storage, and an analysis of the preservation of water resources were made. The analysis is based on three variations of the objective function. The main difference between the scenarios is the financial model of electricity trading. The results showed the profitability of the hybrid system, with a positive impact on the conservation of water resources at the site.

Key words

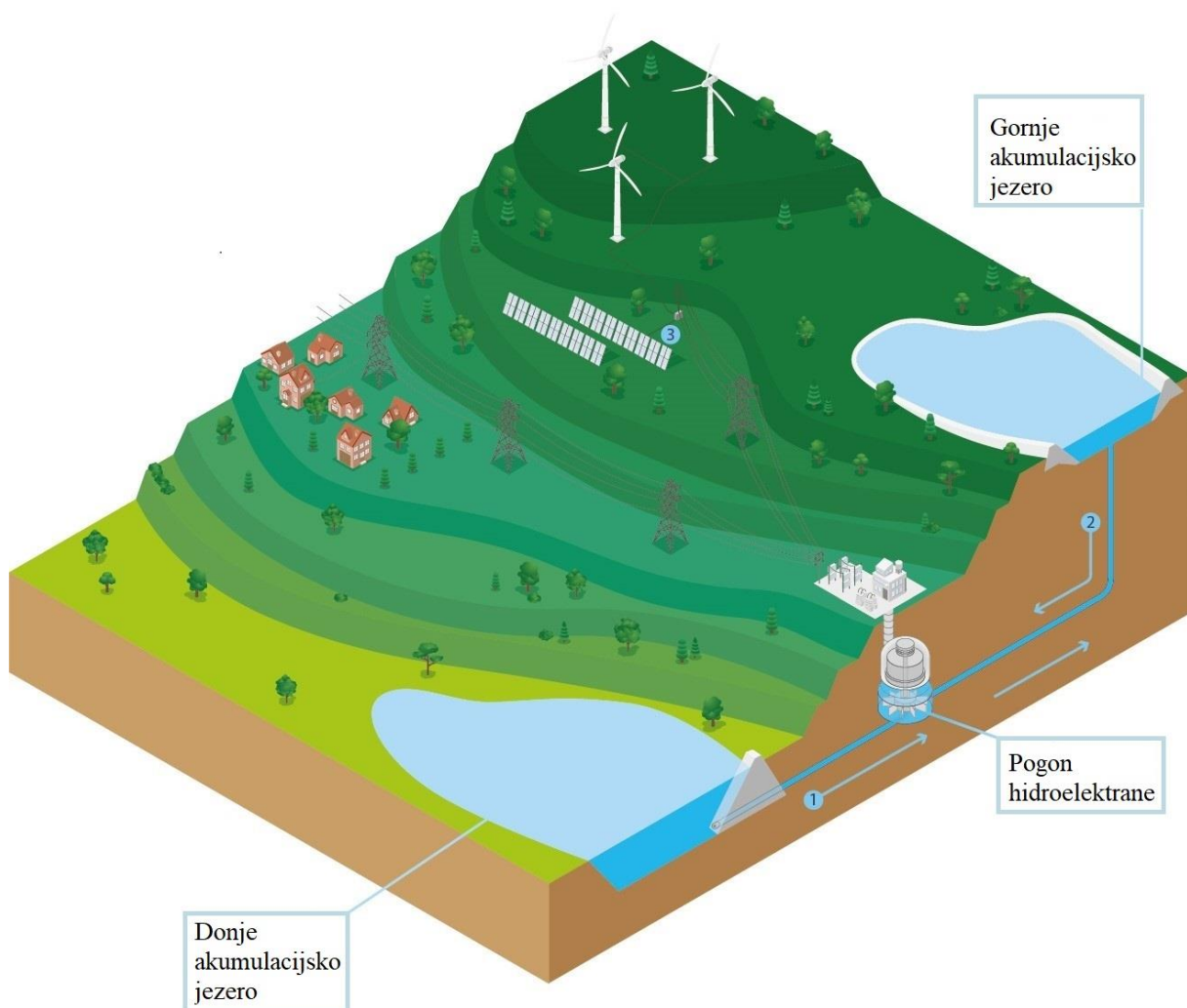
Pumped Storage Hydropower Plants, PSH, Floating Photovoltaic Power Plant, FPV, new technologies, SWOT analysis, renewable energy sources

1. UVOD

Trend implementiranja obnovljivih izvora energije (OIE) u postojeće sustave i tehnološke inovacije obilježile su zadnjih nekoliko desetljeća. Razlog rastućeg trenda povezuje se sa rastom ekonomije i gospodarstva zemalja čime se javlja i znatno veća potreba za energijom. Primjerice, Narodna Republika Kina kao jedna od vodećih gospodarskih velesila u 2014. godini bilježi rast vršne vrijednosti potrošnje od 5,5 puta u odnosu na 2002. godinu. [4] Kombinacijom različitih izvora energije (npr. hibridni sustavi) i postepenim uključivanje OIE u energetske sustav predstavlja najbolji način na koji se osigurava pouzdani elektroenergetski sustav (EES). Osim osiguranja potrebnih zahtjeva EES, uključivanjem OIE postižu se ciljevi sporazuma i strategija o klimatskim promjenama. Primarna mana OIE je ovisnost o vremenskim uvjetima što dovodi do potrebe za uvođenjem sustava za skladištenje energije, npr. baterije. Prednost sustava za skladištenje energije je pohrane energije u vremenu kada potražnja i potrošnja nisu ujednačene. Odnosno, kada proizvodnja premaši vrijednosti koje su trenutno potrebne u EES skladištenjem se energija sprema i time je moguće njeno korištenje naknadno.

Sustavi pohrane energije mogu se podijeliti u 5 kategorija: baterije, skladištenje toplinske energije, mehanička pohrana, pohrana u vodik i pohrana u sustavima reverzibilnih hidroelektrana (RHE). Baterije su najčešća i široko dostupna tehnologija za pohranu električne energije. Baterijski sustavi mogu se puniti električnom energijom koja je proizvedena iz OIE, prilikom čega se pražnjenje baterije optimizira nizom algoritama koji odlučuju kada će se pohranjena energija koristiti za potrebe EES. Skladištenje toplinske energije moguće je postići velikim brojem različitih tehnologija. Spremnici potrebni za pohranu balansiraju se prema potrebama i veličinama sustava, npr. sustav stambenih zgrada, sustav hotela i sl. Potrebno je napraviti ispravno balansiranje između energije potrebne tijekom dana i tijekom noći. Prema kategorijama spomenuta tehnologija se može podijeliti na tri osnovne kategorije: pohrana osjetne topline (engl. *Sensible heat*) (npr. u vodu), pohrana latentne topline (npr. hidrate soli) i termo – kemijska pohrana (npr. kroz kemijske reakcije). Pohrana osjetne topline temelji se na promjeni temperature materijala dok se latentna pohrana temelji na promjeni faze materijala – čvrsta faza u tekuću, a termo – kemijska promjena se odvija na površini materijala. [5] Za mehanički sustavi pohrane energije potrebno je korištenje naprednih tehnologija zbog kompleksnosti sustava. Najčešće se koriste u sustavima koji koriste toplinu, vodu ili zrak s kompresorima ili drugim strojevima. Zbog mogućnosti pohrane energije i do nekoliko dana znatna su ulaganja u razvijanje tehnologije. [6] Jedan od ključnih načina skladištenja energije

je u obliku vodika. Posebna važnost vodika je u sustavima sa stacionarnim spremnicima, prijesnom spremnicima ili skladištenju energije potrebne za transport. Prednost vodika nad drugim gorivima je što ima najveću energiju po jedinici mase, ali zbog male gustoće (pri višim temperaturama) niska je energija po jedinici volumena. Sustavi koji se već godinama koriste za pohranu energije su sustavi RHE. Gravitacijska sila koristi se za proizvodnju električne energije, dok se za vrijeme niske potražnje za energijom ili niske cijene električne energije voda iz donjeg jezera pumpa u gornje jezero. Kapaciteti ove vrste skladištenja ovise o veličini pripadajućih akumulacijskih jezera. Reverzibilne hidroelektrane mogu se podijeliti na: RHE zatvorenog tipa, RHE otvorenog tipa i RHE poluotvorenog tipa. Kod RHE otvorenog tipa jedno od akumulacijskih jezera direktno je povezano s izvorom vode (npr. rijeka), dok kod RHE zatvorenog tipa nema značajnog i stalnog pritoka u jezero. Sustav RHE prikazan je na Slika 1.



Slika 1. Prikaz reverzibilne hidroelektrane [7]

Sustavi RHE predstavljaju 94% globalno instaliranog kapaciteta za skladištenje električne energije. Trenutni sustavi se mogu poboljšati kombiniranjem s ostalim OIE, primjerice s vjetroturbinama ili plutajućim solarnim elektranama čime se povećava fleksibilnost rada sustava. Općenito sustavi HE imaju najznačajniju ulogu u proizvodnji električne energije iz OIE. Na primjer, na kraju 2019. godini ukupno 4207 TWh proizvodnje električne energije dolazilo je iz HE na globalnoj razini. Solarni sustavi i energija vjetra proizveli su 2105 TWh. [8]

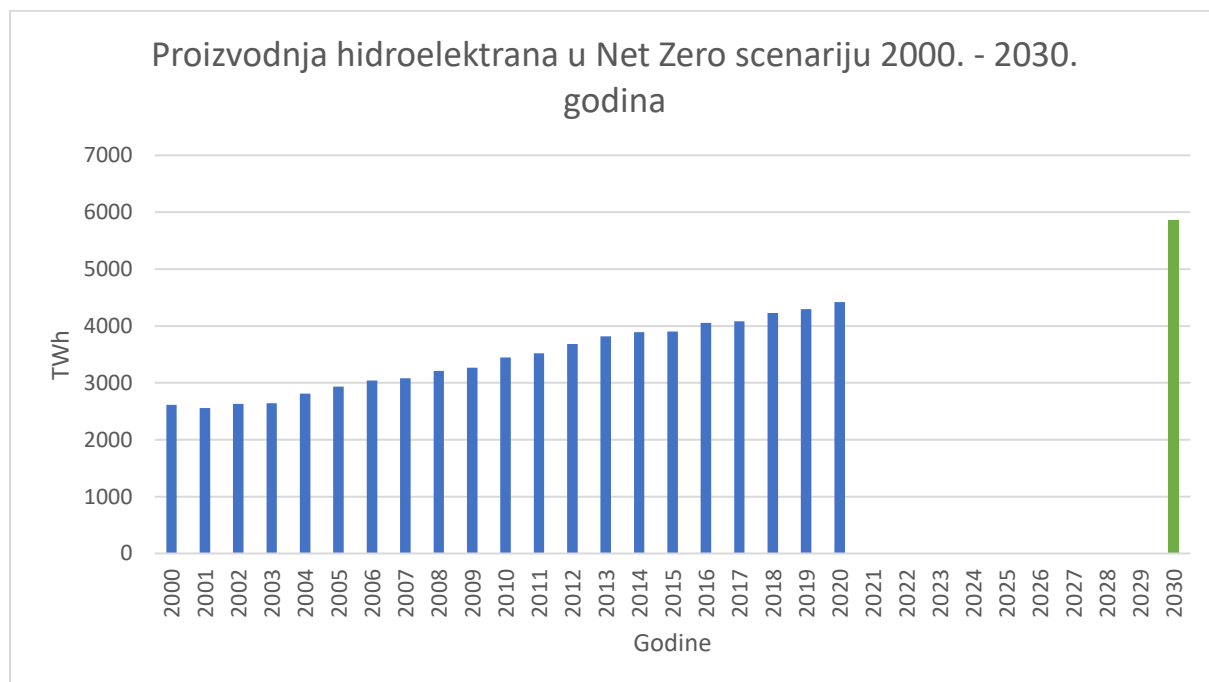
U okviru ovoga rada promatran je hibridni sustav – RHE Velebit i plutajuće solarne elektrane na gornjem akumulacijskom jezeru Štikada. Cilj je proučiti i ispitati na koji način je moguće smanjiti ishlapljivanje gornjeg jezera postavljanjem plutajućih panela te kako se dobivena električna energija iz plutajuće solarne elektrane može koristiti za vrijeme rada HE.

2. SUSTAVI HIDROELEKTRANA

2.1. Općenito o hidroelektranama

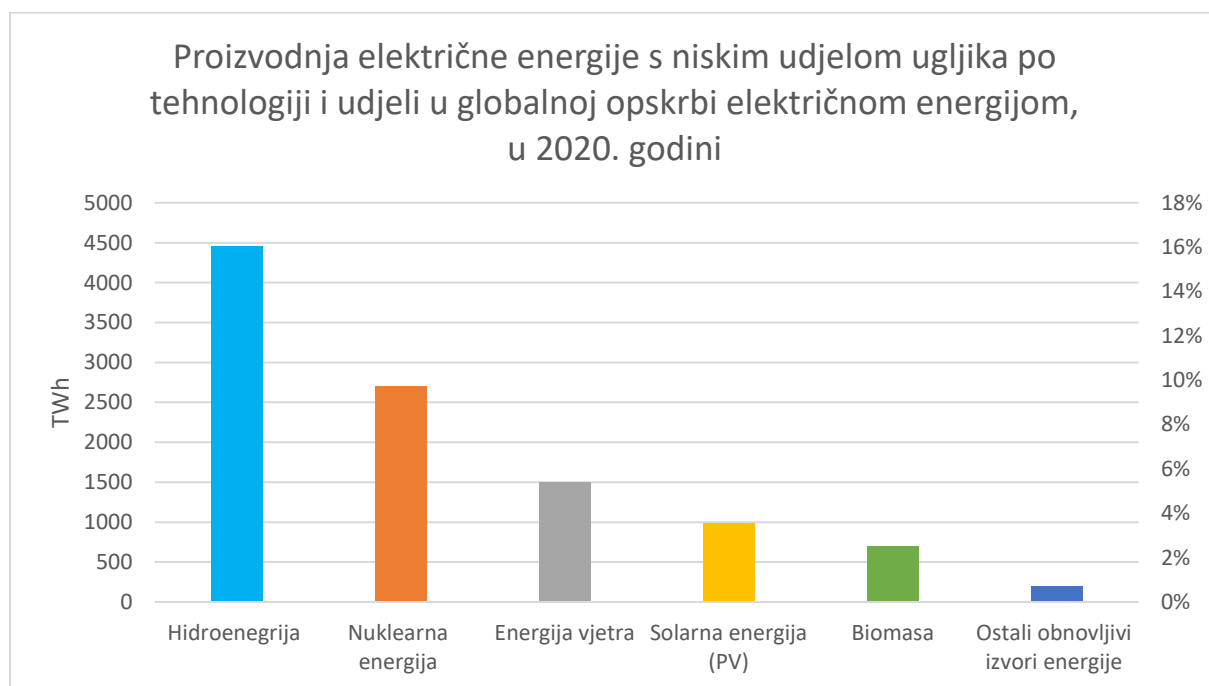
Energija vodotokova ili hidroenergija spada pod OIE. Električna energija dobiva se pretvorbom potencijalne energije vodotokova u mehaničku, zatim preko generatora u električnu energiju. U povijesti su postojali sustavi koji su energiju vode koristili za pogone raznih strojeva, navodnjavanje, mlinove, vodenice i dr. Primjeri korištenja vode za mljevenje pšenice u brašno datiraju iz vremena 2000 godina prije Krista u Grčkoj, dok se kod Egipćana može pronaći primjer korištenja energije u svrhu navodnjavanja. Moderne hidroelektrane (HE) evoluciju započinju 1700-ih kada je francuski vojni inženjer i inženjer vodenih sustava Bernard Forest de Belidor napisao knjigu *Architecture Hydraulique*. [9]

Prema podacima Međunarodne agencije za energiju (engl. *International Energy Agency – IEA*) u 2020. godini ukupna proizvodnja električne energije iz hidroelektrana iznosila je 4418 TWh, što je porast od 3% u odnosu na prethodne godine. Ovakav rezultat odgovara instalaciji i puštanju u rad 21 GW HE na području Narodne Republike Kine i Republike Turske. Energetski plan za 2050. godinu (engl. *Net Zero Emissions by 2050 Scenario*) predviđa dodatan rast proizvodnje energije iz hidroenergije od 3%, odnosno dodatni 48 GW proizvodnih kapaciteta hidroelektrana godišnje u razdoblju između 2020. i 2030. godine. [10]



Graf 1. Proizvodnja hidroelektrana u Net Zero scenariju 2000. - 2030. godina [10]

Prema podacima s Graf 1 vidljiv je rast ukupne proizvodnje električne energije iz instaliranih novih kapaciteta. Međutim, trenutnim rastom ukupnog instaliranog kapaciteta ciljevi postavljeni za 2050. godinu su neostvarivi. Prema podacima za 2020. godinu na svjetskoj razini HE su pokrile jednu šestinu ukupne potrebe za električnom energijom. U razdoblju nakon uvođenja i povećanja proizvodnje iz OIE, proizvodnja iz HE stagnira 17%, Graf 2. Iako je došlo do pada proizvodnje, stabilnost proizvodnje nije narušena.



Graf 2. Proizvodnja električne energije s niskim udjelom ugljika po tehnologiji i udjeli u globalnoj opskrbi električnom energijom, u 2020. godini [11]

Hidroelektrane uvelike doprinose sigurnosti i fleksibilnosti EES. Znakovite karakteristike sustava hidroelektrana osiguravaju mogućnosti brzih povećanja proizvodnje električne energije ili smanjivanjem proizvodnje zbog smanjene potražnje na tržištu, dok znatno sporiji odziv nuklearnih elektrana, postrojenja na ugljen ili prirodni plin u većem broju postrojenja. [12] Uvođenjem OIE na elektroenergetska tržišta, zbog njihove nepredvidivosti – ovisnosti o vremenskim uvjetima, bitno je uskladiti ostale nefleksibilne elektrane. Zbog svoje fleksibilnosti HE predstavljaju jednostavnu tehnologiju koja će u pravo vrijeme odgovarati zahtjevima tržišta. Hidroelektrane se mogu podijeliti:

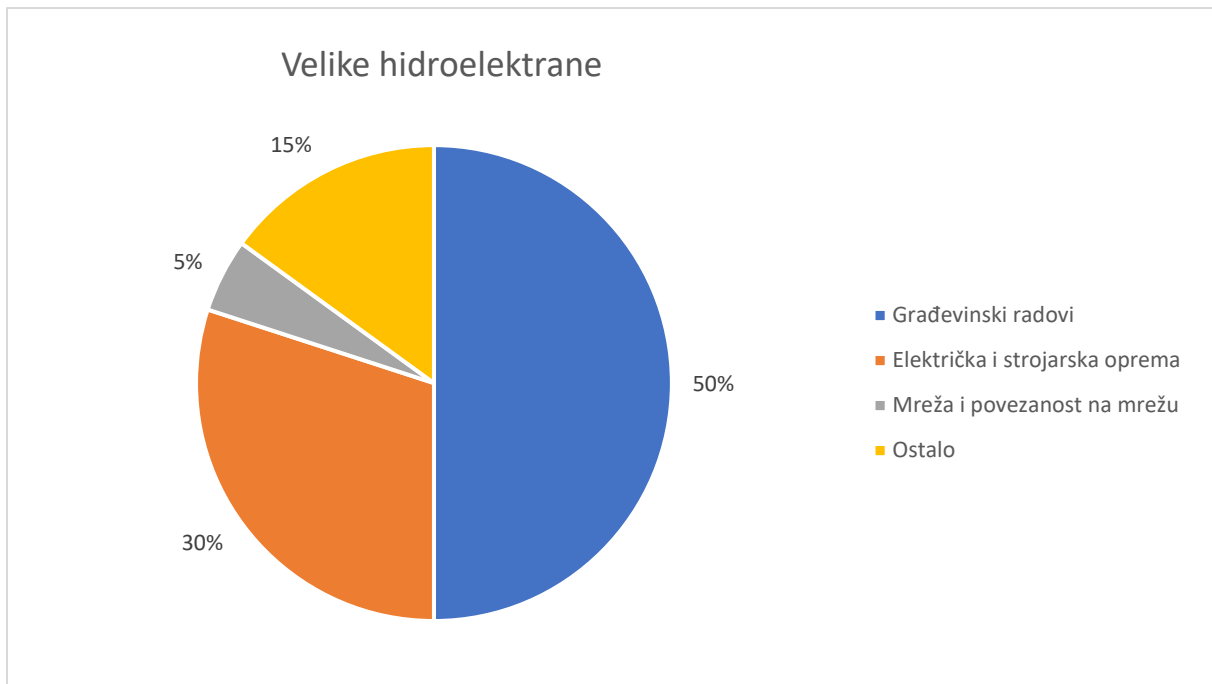
- 1) Prema regulaciji protoka: akumulacijske HE, protočne HE, reverzibilne ili crpno – akumulacijske (reverzibilne) HE;

- 2) Obzirom na način stvaranja geodetskog pada: pribranske HE, derivacijske HE i kombinirane elektrane;
- 3) Prema veličini geodetskog pada: niskotlačne HE (od 2 m do 20 m), srednjetačne HE (od 20 m do 100 m) i visokotlačne HE (iznad 100 m).

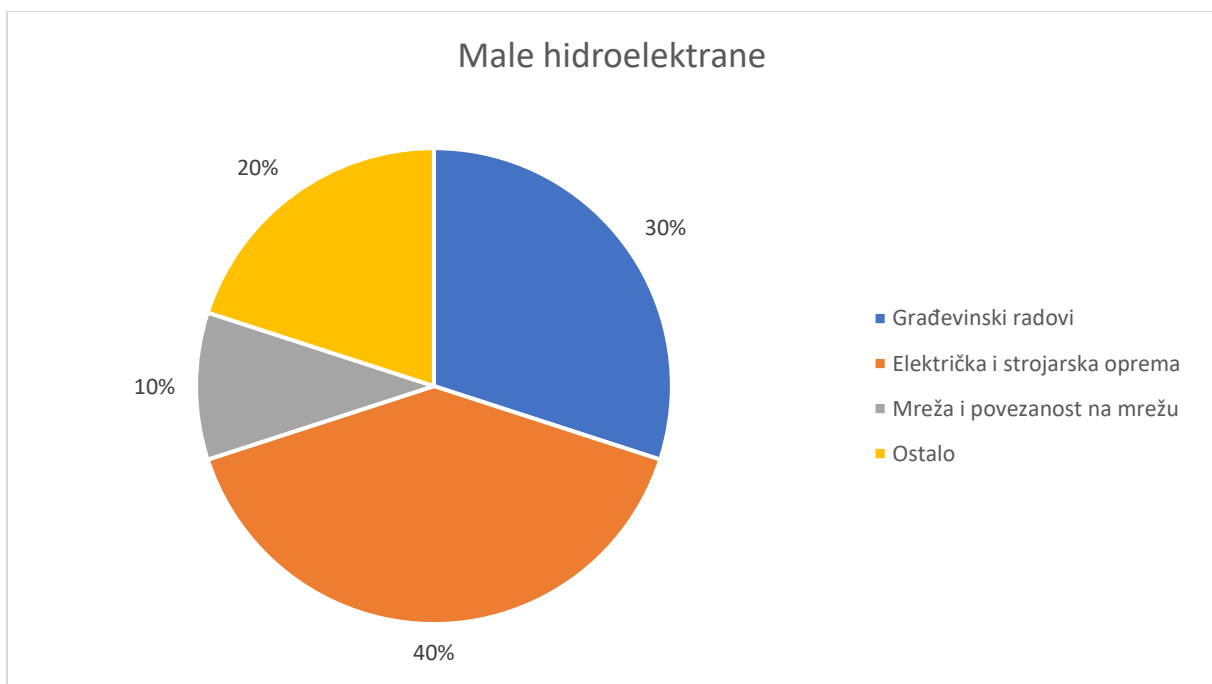
Fleksibilnost sustava hidroelektrane ovisi o regulaciji protoka i o veličini HE. Karakteristika akumulacijskih HE je pohrana potencijalne energije u akumulacijskom jezeru, što omogućava jednostavnu regulaciju protoka. Reverzibilne HE sastoje se od dva akumulacijska jezera – gornjeg i donjeg. Zavisnost gornje i donje akumulacije funkcionara na sljedeći način: prilikom niske potražnje za električnom energijom voda se pumpa iz donjeg u gornje jezero, dok kod veće potražnje voda iz gornjeg jezera se propušta kroz turbinu. Balansiranje akumulacija (gornje i donje) moguće je napraviti prema satnoj, dnevnoj, mjesečnoj ili godišnjoj potrošnji. Preciznom regulacijom osigurava se sigurnost EES-a. Ova dva tipa HE karakterizira laka regulacija protoka, mogućnost skladištenja vode u akumulacijama i isplativost investicije. Podatak koji govori o tome je da reverzibilne HE osiguravaju gotovo 85% ukupne količine svjetski instaliranih skladišnih kapaciteta energije, odnosno 190 GW. [11]

Većina naprednih gospodarstava koristi hidroenergiju, zbog gore opisanih karakteristika. Popularizacija izgradnje HE događa se između 1960 – ih do 1980 – ih, što znači da većinu postojećih HE treba modernizirati. Svjetskim pregledom HE Sjeverna Amerika ima prosjekom najstarije HE – u (oko 50 godina), a Narodna Republika Kina najmlađe (oko 15 godina). Zbog životnog vijeka tehnologije između 45 i 60 godina, potrebna je temeljita obnova i ulaganje za postizanje modernizacije, poboljšavanja rada sustava i povećanja fleksibilnosti sustava. Osnovna obnova uključuje obnovu turbina i generatora, digitalizaciju sustava, povećanje sigurnosti, postavljanje i poboljšavanje trenutnih ekoloških i društvenih mjera. Mjere poboljšanja rezultiraju povećanje proizvodnje od 5% do 10% u odnosu na stanje prije obnove. [11] Investiranje u modernizaciju HE složen je izračun koji ovisi o vlasništvu i mogućnostima vlasnika. Tipični investicijski troškovi kod velikih i malih HE¹, Graf 3 i Graf 4.

¹ Male hidroelektrane – instalirani kapacitet manji od 10 MW,
Velike hidroelektrane – instalirani kapacitet jednak i veći od 10 MW.



Graf 3. Investicijski troškovi kod velikih hidroelektrana² [11]



Graf 4. Investicijski troškovi kod malih hidroelektrana² [11]

² U proračun je uključeno: planiranje projekta, procjena utjecaja na okoliš, izdavanje dozvola, otkup zemljišta i ostali troškovi.

Kao i kod troškova obnove i održavanja HE, troškovi novih investicija su visoki i specifični. Razlikuju se u svakome projektu, a određeni su nizom faktora, kao što su hidrološki uvjeti, teren, geologija, ekosustav i dr. Primjerice kod velikih HE (Graf 3) građevinski radovi iznose 50% ukupne investicije zbog veličine samog sustava i potrebe za obnovom zahtjevnih infrastrukturnih dijelova, npr. brana. Međutim, investicijski radovi svedeni na MW pokazuju da su ulaganja u veća postrojenja isplativija. U konačnici ukupna investicija u novi projekt (greenfield investicija) za HE može se procijeniti između 1200 USD/kW i 4500 USD/kW. Uzme li se u obzir veličina HE dobiva se puno detaljniji prikaz investicije. Pritom se investicije za male HE mogu procijeniti na 10 000 USD/kW dok za velike HE na 1000 USD/kW. [11]

Prilikom procijene projekta bitno je definirati nivelirane troškove proizvedene električne energije (engl. *Levelized cost of energy* – LCOE) za potrebe definiranja marginalnih cijena energije. Kapitalni troškovi HE obično čine od 80% do 90% LCOE. Vođenje i održavanje sustava čini ostatak. Postotak koji se odnosi na vođenje i održavanje sustava ovisi o lokaciji projekta, veličini HE i o opremljenosti sustava.

2.2. Prednosti i mane hidroelektrana

U kontekstu prelaska na sustave sa većinskim udjelom OIE, hidroenergija predstavlja jedan od najvažnijih izvora zbog svoje fleksibilnosti, mogućnosti skladištenja, kontrole proizvodnje i dr. Međutim, tehnologija HE – a kao i svaka tehnologija ima svoje mane. Velika raznolikost projekata vezanih za hidroenergiju dovodi do različitih utjecaja na okoliš, društvo, utjecaja na stvaranje negativnih efekata na prirodu i dr. Većina ovih problema direktno je vezana na promjene u hidrološkom režimu rijeka, stvaranju akumulacija (uzvodno) i problemima protoka koji se dešavaju nizvodno. Većom promjenom hidroloških režima dolazi do značajnijih utjecaja na okoliš. Prilikom izrade projekta, bez obzira na veličinu, potrebno je dobro definirati prednosti i mane, kako bi se minimizirale negativne posljedice projekta. Daljnji tekst pobliže će prikazati mane projektiranja HE jer su prednosti objašnjene u prijašnjem poglavlju.

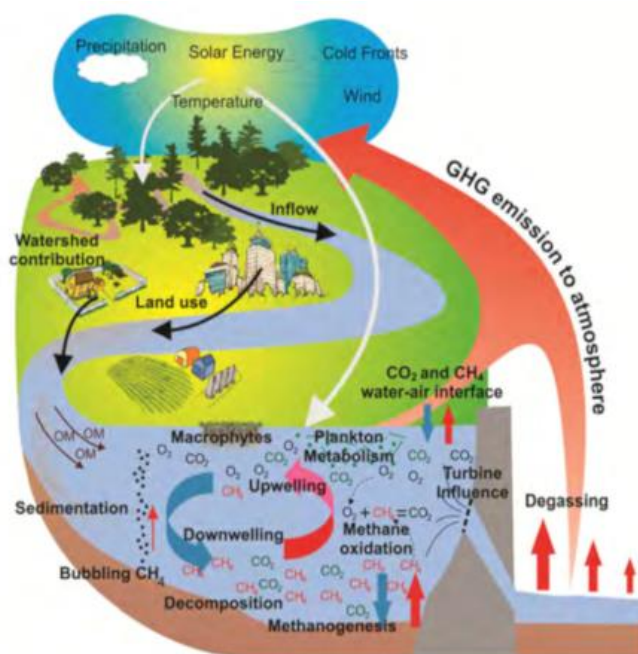
Tablica 1. Prednosti i mane sustava hidroelektrane

Prednosti projekta hidroelektrane	Mane projekta hidroelektrane
<ul style="list-style-type: none"> • Mogućnost izrade različitih projekta u ovisnosti o potrebama i mogućnostima lokacija • Različita upravljanja protokom (npr. protočne HE, reverzibilne i dr.) • Razvijanje jedinstvenih projekta (npr. HE sa branom) • Jednostavna optimizacija • Dugi životni vijek • Mogućnost skladištenja energije • Dobro razvijena tehnologija • Mogućnost skladištenja vode • Multifunkcionalnost brane 	<ul style="list-style-type: none"> • Različite faze utjecaja na okoliš u životnom ciklusu postrojenja • Emisije stakleničkih plinova iz akumulacija • Protok sedimenta • Mogući geološki i hidrogeološki učinci • Posljedice na biljni i životinjski sustav • Socijalne i društvene posljedice

Različite faze utjecaja na okoliš u životnom ciklusu postrojenja – svaki životni ciklus projekta može se podijeliti na tri faze: izgradnja, kontinuirani rad i demontaža. Prvu fazu – izgradnja, karakterizira upotreba velike količine materijala poput betona, pijeska, gline ili riprpa, te korištenje specijalizirane mehanizacije za dopremanje i postavljanje opreme poput turbina, generatora, upravljačkih ploča i dr. [13] Potrebna energija za izgradnju projekta naziva se ugrađena energija (engl. *embodied energy*), koja ulazi u ukupnu sumu energije korištene za vrijeme životnog ciklusa određenog postrojenja. Prilikom demontaže objekta može se očekivati isti učinak kao i kod montaže, ali je učinak ublažen zbog dugog vijeka trajanja objekta. Naravno, prilikom rada može doći do ne predviđenih nezgoda, poput istjecanja ulja ili masti, što dovodi do značajnog utjecaja na okoliš. Napretkom tehnologije za podmazivanje se danas koriste biorazgradive masti.

Emisije stakleničkih plinova iz akumulacija – bilo da dolaze iz akumulacija namijenjenih za proizvodnju električne energije, okoliša u neposrednoj blizini ili iz faza rada HE potrebno je napraviti neto bilancu stakleničkih plinova. Bilanca može varirati prema vrsti okoliša (šume,

tropske regije i dr.), prema razdoblju u godini i ovisno o klimatskim promjenama. Zbog utjecaja okoliša na neto bilancu stakleničkih plinova potrebno je napraviti bilanciranje kroz duži niz godina, reda veličine 100 godina. Potrebno je obratiti pozornost da su prirodne rijeke same po sebi već proizvođači stakleničkih plinova čije emisije ovise o vrsti slivnog područja (vrsta tla, vegetacija, brzina oksidacije i o živim organizmima). Prilikom stvaranja umjetnih akumulacijskih jezera potreban je određeni broj godina, npr. u području tajge potrebno je 10 godina, kako bi umjetna jezera uspostavila istu biološku ravnotežu kao i prirodna jezera. Za vrijeme prilagodbe prirode na promjenu stanja okoliša dolazi do značajnog ispuštanja metana. Promjene koncentracije stakleničkih plinova mogu se okarakterizirati na sljedeći način: povećanjem poplavljenе površine i smanjenjem dubine. Povećanjem dubine emisije se mogu podijeliti na emisije koje se nalaze na površini akumulacije i emisije nizvodno nastale otpinjanjem kroz turbinu koje sadrže visoke razine metana jer se uzimaju iz dubokih voda. Smanjenjem dubine dolazi do povećane koncentracije stakleničkih plinova. [13]



Slika 2. Proizvodnja stakleničkih plinova [13]

Protok sedimenta – normala pojava do koje dolazi prilikom strujanja rijeke je tranzit sedimenta duljinom njenog toka. Protok sedimenta se tako može značajno narušiti prilikom zatvaranja toka branom, promjene toka ili narušavanjem ravnoteže u koritu. Posljedice na protok sedimenta mogu se podijeliti na posljedice uzvodno, posljedice nizvodno i posljedice preusmjeravanja toka. Strujanje rijeke karakterizira brzina strujanja koja opada približavanjem

brani, te se brzina na brani može smatrati jednaka nuli. Protok sedimenta zbog posljedica brzine strujanja ponaša se tako da se taloženje grubog materijala odvija uzvodno od brane, dok se finiji materijal taloži u neposrednoj blizini. Posljedice nakupljanja sedimenta rezultiraju smanjenjem korisnog kapaciteta akumulacije što neposredno utječe na proizvodnju električne energije. Dolazi do podizanja razine vode uzvodno što može stvarati velike probleme u vrijeme poplava, dolazi do erozije cjevovoda i turbina zbog visoke koncentracije sedimenta i dr. Nizvodne posljedice karakterizira manjak sedimenta što rezultira usjekom korita i erozijom obale. Kod promjene smjera toka, sediment se može taložiti na izvorima pritoka, što za vrijeme poplava dovodi do velikih bujica. Zbog protoka sedimenta mogu se javiti posljedice. Prilikom izrade preliminarnih studija uzima se u obzir hidro morfološka komponenta pomoću koje se određuje utjecaj sedimenta. [13]

Mogući geološki i hidrogeološki učinci – projektiranjem akumulacija i pomoćnih kanala može dovesti do stvaranja problema kod toka podzemnih voda. Primjerice, zatvaranje brana može dovesti do potresa kao u Sichuanu u Narodnoj Republici Kini 2008. godine. [13]

Posljedice na biljni i životinjski sustav – izgradnjom brana postoji velika mogućnost utjecaja na faunu zbog direktne promjene na hidrološki režim rijeke. Promjenom hidrološkog režima rijeke dolazi do direktnih posljedica na cijelom toku, odnosno dolazi do smanjenja bioraznolikosti. Nepravilnim upravljanjem protoka za vrijeme rada elektrana, dolazi do promjena i uništavanja mrjestilišta. Postoji velika mogućnost da zbog izgradnje HE dolazi do smanjene mogućnosti kretanja određene vrste, npr. losos koji živi u slanoj vodi, a mrjestilište mu je u slatkoj vodi. Kako bi se omogućila migracija riba, odnosno smanjio utjecaj HE na prirodno kretanje populacije riba i vodozemaca osmišljeni su različiti sustavi. Primjerice, sustav ribljeg prolaza vidljiv na Slika 3.



Slika 3. Riblji prolaz na rijeci Columbia [14]

Povećanom mogućnošću nastanka poplava dolazi do uništavanja endemskih i zaštićenih biljnih vrsta u neposrednoj blizini akumulacijskih jezera. Nizvodno, zbog mogućnosti smanjenog protoka dolazi do isušivanja zemlje što za posljedicu ima uništavanje flore. U nekim slučajevima zbog promjene u prirodnom toku dolazi do razvitka novih vegetacija poput vodenog zumbula ili do nekontroliranog rasta algi. Problem rasta algi dovodi do povećanja broja insekata, ugrožavanja prirodnih staništa faune i ometanja protoka vode. Problemi uzrokovani algama mogu se otkloniti mehaničkim sredstvima, odnosno čišćenjem dna. [13]

Socijalne i društvene posljedice – izgradnja HE može imati direktne i indirektne posljedice na stanovništvo u neposrednoj blizini koje se manifestira na promjenu načina života ili trajnu migraciju sa područja HE.

2.3. SWOT analiza hidroelektrana

Većina država danas hidroenergiju koristi zbog jednostavnosti dobivanja energije, dugog vijeka trajanja tehnologije i zbog sukladnosti tehnologije sa energetske strategijama. Hidroenergija se po svim karakteristikama može svrstati u tehnologiju koja je sa ekonomskog stajališta jednostavna za investiranje. Osim jednostavnog investicijskog modela, ne rijetko administrativni dio dovodi do obustave projekta u potpunosti. Primjerice projekt se može usporiti predugim čekanjem uporabne dozvole, lokalno protivljenje ili sklonost prema određenim investitorima. Sljedeća tablica (Tablica 2) pokazuje najvažnije faktore na koje se

treba obratiti pozornost prilikom upravljanja projektima HE, odvojeno prema Greenfield investiciji³, Brownfield investiciji⁴ i obnovi već postojećeg objekta. Utjecaji na investiciju su u tablici (Tablica 2) označeni kao visoki utjecaj (V), srednji utjecaj (S) i mali/niski utjecaj (N).

Tablica 2. Utjecaj najvažnijih faktora na izgradnju hidroelektrane [11]

Značajka	Greenfield investicija	Brownfield investicija/ obnova već postojećeg pogona
Dugotrajnost izrade studije utjecaja na okoliš	V	S
Protivljenje lokalne zajednice	V	S
Neizvjesna politička potpora	V	S
Neizvjesnost oko veleprodajne cijene električne energije	V	V
Visoki investicijski troškovi i kratko vrijeme povrata investicije	V	S
Dugo razvojno vrijeme projekta	S	N
Visoke cijene i drugo trajanje izrade studija izvodljivosti	S	N
Neizvjesnost oko ekoloških pojava (regulacija vode i okoliš)	S	S
Mala naknada za pomoć radu elektroenergetskog sustava	S	S
Mala naknada za ne energetske usluge (npr. kontrola poplava, navodnjavanje)	S	S

³ Greenfield investicija – hrv. *Ulaganje u nove kapacitete* – „investicija ledine“ – predstavlja ulaganja u novu proizvodnu imovinu, odnosno pokretanje projekta od praznog zemljišta. Ovakvi projekti gotovo uvijek iziskuju velika kapitalna ulaganja i visoki rizik investicije. Prednosti ovakvih investicija su mogućnost ostvarivanja novih znanja i novih radnih mjesta, uravnoteživanje platne bilance zemlje i povećanje broja ulagača. Mane se manifestiraju u mogućnosti zagađivanja okoliša, promjeni cijena i strukture domaćeg tržišta. [51]

⁴ Brownfield investicija – hrv. *Ulaganje u postojeće kapacitete* – predstavljaju ulaganja u već postojeće kapacitete (postojeće poslovne zgrade, pogoni ili sustavi). Zbog ulaganja u već postojeće kapacitete ovakav oblik ulaganja poželjniji je od greenfield investicije. Prednosti ovakve investicije su niski rizik i veća isplativost zbog već postojeće infrastrukture. Mane se manifestiraju kroz mogućnost smanjivanja poslovnih aktivnosti preuzetog poduzeća, mogući pravni ili strateški problemi sa zemljištem i potencijalno sporiji povrat investicije u odnosu na greenfield ulaganje. [51]

Visoki rizik preuzimanja (engl. <i>off-taker risk</i>)	S	N
Visoke cijene koncesija i poreza	S	N
Teško spajanje na elektroenergetsku mrežu	S	N
Visoki troškovi naknade za vodu	N	N
Starost stručne radne snage	N	N
Nesigurnost kod obnove koncesija	Ne definirano	V
Ne predvidivost klimatskih promjena na hidrološke uvijete (lokalna razina)	S	S
Pravni sukobi oko međunarodnog upravljanja vodama	S	N

Tablica 2 pokazuje da iako je tehnologija visoko zastupljena, potrebna je velika preciznost kod određivanja parametra za rad iste. Dakako, najveći problem koji se javlja je nepredvidivost klimatskih promjena i neposrednog utjecaja na vodostaje. Ovakva predviđanja moguće je odrediti na globalnoj razini iz podataka poput promjene temperature ili zagrijavanje određenog područja. Međutim, na lokalnoj razini ovakve promjene je teško pretpostaviti u potpunosti. Prije svega, kod izrade planova za projekte potrebno je razmotriti sve mogućnosti koje HE kao objekt pruža. Pristupom u kojemu se detaljno pregledava i istražuje dodatna mogućost upotrebe objekta može poslužiti pri lakšem rješavanju pojedinih problema navedenih u Tablica 2, npr. protivljenje lokalne zajednice. Brana, primjerice, može poslužiti kao dodatni resurs za navodnjavanje, poljoprivredu, opskrbu pitkom vodom, transport, kontrolu poplava, rekreaciju i turizam ili kao površina za postavljanje dodatnih tehnologija koje povećavaju efikasnost elektrane. Vijek trajanja brana i HE je oko 50 godina, time se uz gore navede ekonomske pristupe uzima i ovaj društveno – ekološki aspekt. Međutim, ponekad je teško razviti višenamjenske brane zbog teškog odlučivanja na taj postupak i zbog potrebe za dugoročnim energetske planiranjem. Ukupno u svijetu postoji 58 000 velikih brana od kojih je 38 000 kategorizirano kao višenamjensko. Afrika i Azija – Pacifik, kao regije koje se u velikoj mjeri bave poljoprivredom, gdje je preko 40% brana definirano pod višenamjenske te se koriste za proizvodnju električne energije, navodnjavanje i kao izvor pitke vode. [11] Naravno, kao i kod svake tehnologije postoje njene prednosti i mane koje će biti prikazane u SWOT analizi, Tablica 3.

Tablica 3. SWOT analiza hidroelektrane

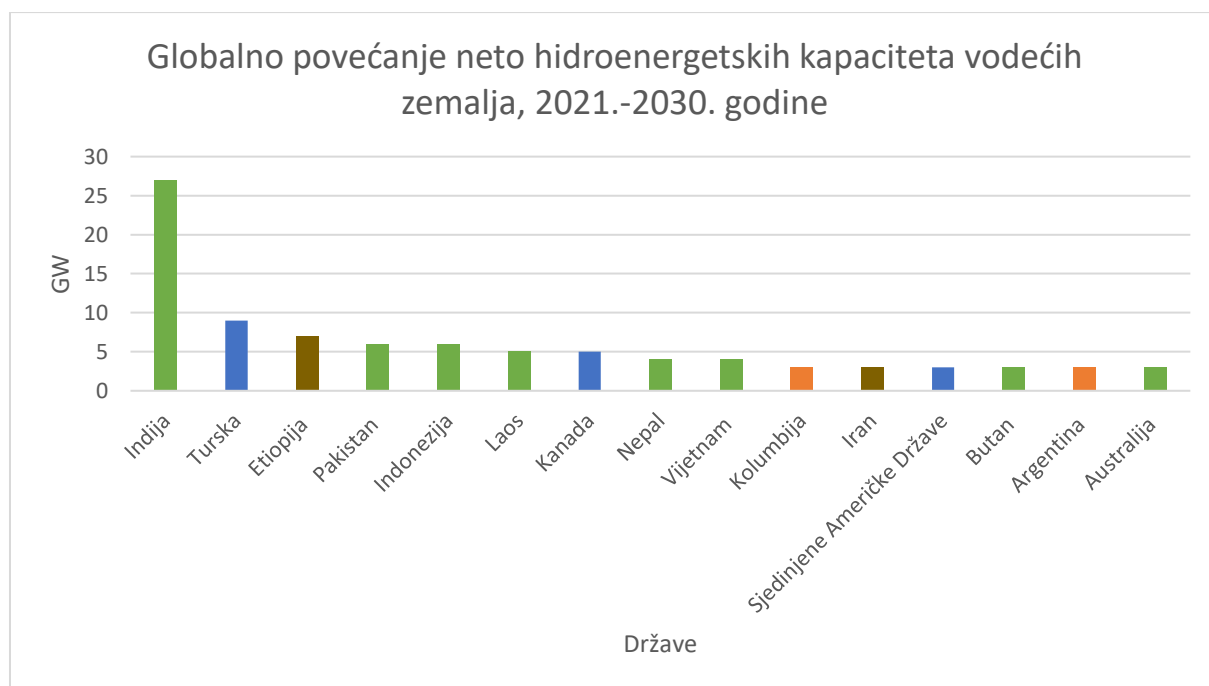
Snaga (engl. <i>Strengths</i>)	Slabosti (engl. <i>Weaknesses</i>)
<ul style="list-style-type: none"> • OIE • Niski troškovi procesa dobivanja energije (ovisno o projektu) • Poznata tehnologija i procesi rada • Mogućnost višenamjenskog iskorištavanja brane i akumulacije • Razvoj različitih veličina HE u odnosu na potrebe • Različiti režimi rada 	<ul style="list-style-type: none"> • Visoki investicijski troškovi • Dugotrajna izrada projekta • Teško dobivanje dozvola • Proizvodnja energije može ovisiti o vodostaju i o klimatskim promjenama • Kod akumulacijskih HE potrebna je velika površina za akumulacijsko jezero
Prilike (engl. <i>Opportunities</i>)	Prijetnje (engl. <i>Threats</i>)
<ul style="list-style-type: none"> • Jednostavna regulacija • Visoki ekonomski i socijalni utjecaj • Isplativi projekt • Dugi životni vijek • Sustav se može koristiti za zaštitu od poplava • Niska ulaganja za povećanje proizvodnje energije • Jedinstveni projekti 	<ul style="list-style-type: none"> • Starenje stručnog kadra • Visoke cijene održavanja opreme • Problemi sa lokalnom zajednicom • Mogućnost promjene kvalitete vode • Mogućnost smanjenja raznovrsnosti biološkog svijeta neposredno u blizini • Loše projektiranje • Politička ne stabilnost zajednice • Mogućnost dodatnih emisija zbog taloženja biološkog materijala na dnu akumulacijskih jezera, koja vremenom može osloboditi u atmosferu

2.4. Hidroelektrane u svijetu

Pregledom najvećih HE na svijetu, može se potvrditi da se sve više gospodarstava odlučuje za korištenje ove tehnologije kao vodeće tehnologije za proizvodnju električne energije iz OIE. Zbog stalne nadogradnje, renovacija, nove gradnje i tehnoloških inovacija najveći proizvođači i najveće HE se stalno mijenjaju. Potrebno je napomenuti da će trenutni poredak biti promijenjen u skorijoj budućnosti, što je moguće vidjeti i na Graf 5. Razdoblje između 2010.

godine i 2020. godine obilježava nagli porast neto hidroenergetskih kapaciteta. Međutim u razdoblju između 2021. godine i 2030. godine očekuje se povećanje neto hidroenergetskog kapaciteta od 23% što je manje nego u prethodnom periodu. Razlog sporijeg rasta neto hidroenergetskog kapaciteta je usporeni razvoj novih projekata u Narodnoj Republici Kini, Latinskoj Americi i Europi. Međutim, iako postoji pad kod vodećih država prema instaliranim neto hidroenergetskim kapacitetima raste broj projekata u azijsko – pacifičkoj regiji, Africi i na Bliskom Istoku, Graf 5. Vodeća zemlja u instalaciji je Indija (Graf 5) gdje se očekuje nastavak zaustavljenih projekata, dok zemlje poput Laosa i Nepala razvijaju veliki broj projekata za izvoz energije. Većina hidroenergetskih kapaciteta u Latinskoj Americi nalazi se na području Republike Brazil, ali zbog zabrinutosti o utjecaju na okoliš (npr. suša) usporava se razvoj hidroenergetskih kapaciteta, te se očekuje njihov razvoj u drugim zemljama Latinske Amerike odnosno u Kolumbiji i Argentini. [11]

Podaci za pisanje ovoga rada uzeti su prema podacima iz 2021. godine. [15]



Graf 5. Globalno povećanje neto hidroenergetskih kapaciteta vodećih zemalja, 2021.-2030. godine⁵ [11]

⁵ Zbog velikih neto povećanja hidroenergetskih kapaciteta na Graf 5, Narodna Republika Kina nije prikazana [11]

Prema poretku može se zamijetiti da je trenutno najveći proizvođač Narodna Republika Kina, a slijede ju Savezna Republika Brazil, Sjedinjene Američke Države i Ruska Federacija.

a) Tri klanca, Narodna Republika Kina – **22,5 GW**

Izgradnja HE na rijeci Jangce (izvorno – *Yangtze*) započeta je 1994. godine, a u pogon je puštena 2003. godine. Potpuno je završena 2012. godine. Hidroelektrana se sastoji od gravitacijske brane visine 181 m i dužine 2,335 km. Svaka turbina ima izlaznu snagu od 700 MW, a u postrojenju se koriste 32 Francisove turbine promjera 9,7/10,4 m koje se okreću brzinom 75 okretaja u minuti. Izgradnjom HE raseljeno je 1,3 milijuna ljudi sa ovoga područja. Pozitivni utjecaj ima proizvodnja električne energije, ako se pretpostavi da je za 1 kWh električne energije otprilike potrebno 366 grama ugljena HE Tri klanca svojom proizvodnjom smanjuje potrošnju ugljena za otprilike 31 milijun tona godišnje [16], smanjenje emisije sumporovog oksida za 1 milijun tona godišnje, smanjenje emisije dušikovih oksida za 370 000 tona godišnje, smanjenje emisije ugljikovog monoksida za 10 000 tona godišnje i smanjenje količine žive. Mana ove HE je nakupljanja sedimenta na brani zbog kojega dolazi do povećane upotrebe kemikalija u poljoprivredi i postoji mogućnost dodatne degradacije tla. [17]



Slika 4. Pogled odozgo na hidroelektranu Tri klanca (*dio kontrole poplava*) [18]

b) Itaipu, Savezna Republika Brazil i Republika Paragvaj – 14 GW

Hidroelektrana se nalazi na granici između Savezne Republike Brazil i Republike Paragvaji. Veličinom je najveća HE po proizvedenoj električnoj energiji od oko 94,7 TWh. Proizvedena električna energija pokriva približno 25% brazilskih potreba i približno 95% potreba Paragvaja. Gravitacijska brana zajedno sa zemljanim branama koje se nalaze u nizu ima ukupnu duljinu od 7,76 km, a površina akumulacijskog jezera iznosi 1350 km². Zbog veličine postrojenja prilikom izgradnja ove brane preseljeno je 10 000 obitelji sa područja uz rijeku Parana. Najveća prednost ove HE, pokazala se prilikom izrade studije okoliša na akumulacijskom jezeru. Studijom je pokazano da postojeća akumulacija nema značajnog utjecaj na okoliš. [19]

c) Xiluodu, Narodna Republika Kina – 13,86 GW

Hidroelektrana se nalazi na rijeci Jinsha. Brana ove HE visine je 285,5 m, a dužine 700 m i ima višestruku namjenu od koje je jedna očuvanje područja od poplava. Postrojenje se sastoji od 18 Francis turbine, pojedinačne snage 770 MW. [20]

d) Guri, Bolivarijanska Republika Venezuela – 10,20 GW

Hidroelektrana se nalazi na rijeci Caroni. Brana je duga 7426 m i visoka 162 m. Prema energetske strategiji iz 1960 – tih postavljen je cilj za smanjenje potrošnje fosilnih goriva kako bi se omogućila veća zarada izvozom istih. Zbog vodenih bogatstava države i zbog velikog potencijala iskorištavanja hidroenergije, danas Venezuela 82% svoje električne energije dobiva iz OIE od kojih 73% ukupne električne energije dolazi iz ove HE. Postrojenje se sastoji od 21 Francis turbine. [21]

e) Belo Monte, Savezna Republika Brazil – 9,39 GW

Hidroelektrana koja se nalazi na rijeci Xingu. Prvi idejni plan za izgradnju ove HE napravljen je 1975. godine dok je elektrana puštena u pogon 2016. godine. Postrojenje se sastoji od 18 Francis turbina. Hidroelektru od početka prate velike kontroverze zbog značajnog utjecaja na okoliš. Veličina akumulacijskog jezera je 668 km² čijom poplavom dolazi do poplavljanja 400 km² šume (0,01% Amazonske šume). Poplavljanjem područja došlo bi do velikog gubitka flore i faune, smanjenja kvalitete vode i dovelo bi do privremenog prekida vodoopskrbe u koritu rijeke Xingu na 7 mjeseci. [22]

f) Tucuruí, Savezna Republika Brazil – **8,37 GW**

Hidroelektrana se nalazi u sjevernom Brazilu na rijeci Tocantins. Hidroelektrana se sastoji od 25 vodnih turbina i godišnje proizvede oko 21,4 TWh električne energije. [23]

g) Grand Coulee, Sjedinjene Američke Države – **6,80 GW**

Hidroelektrana se nalazi na rijeci Columbia i ima gravitacijsku betonsku branu višestruke namjene. Hidroelektrana se sastoji od 4 različite strojarnice sa ukupno 33 električna generatora. [24]

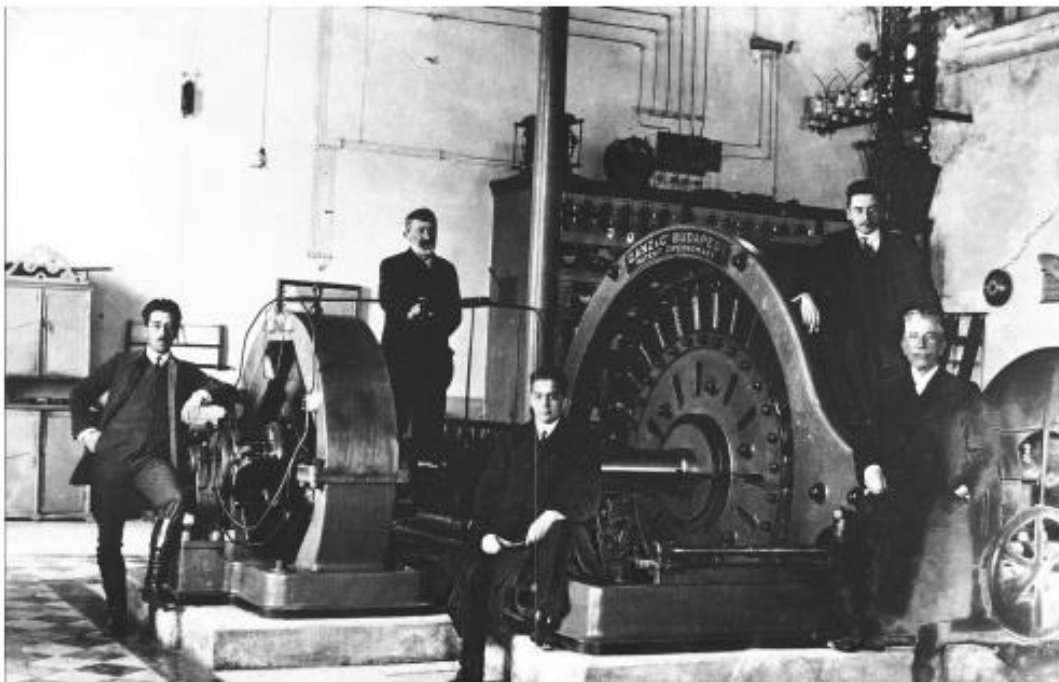
2.5. Hidroelektrane u Republici Hrvatskoj



Slika 5. Hidroelektrane u Republici Hrvatskoj [25]

Prvi projekti HE u Hrvatskoj započeli su u 19. stoljeću. Prema zapisima jedan od prvih govora o elektrifikaciji Zagreba u Gradskome poglavarstvu održao je Nikola Tesla. Vijest o predavanju objavljena je u Narodnim novinama i Obzoru pod naslovom „Nikola Tesla o električnoj

razsvjeti u Zagrebu“. [3] Zbog velikih ne slaganja oko prelaska na električnu energiju, jer se u to vrijeme većinom koristi plinski sustav za rasvjetu, hidroenergija se najviše koristi za industriju, npr. u Dugoj Resi. Prvi zapis o potpuno organiziranom radu EES s hidroelektranom, iz 1895. godine, postavljen je u Šibeniku. Te godine Šibensko poduzeće Šupuk (Slika 6) izgradilo je HE Jaruga na Skradinskom buku na rijeci Krki. Hidroelektrana je dimenzionirana s padom od 10 m, jednom turbinom s dvofaznim generatorom snage 320 KS, 315 okr/min i 42 Hz. [3] Sva proizvedena električna energija prenosila 11 km do Šibenika te se koristila za pokretanje mlinova, tvornica i za rasvjetu.



Slika 6. Obitelj Šupuk, Vjekoslav Meichsner i suradnici kod generatora u HE Krka (Jaruga 1) [26]

2.5.1. Hidroelektrane u slivu rijeke Drave

Hidroelektrane koje se nalaze na slivu rijeke Drave su višenamjenske. Tri elektrane napravljene su kao pribranske elektrane što je pogodno za iskorištavanje dionica Drave od Ormoža do ušća Mure. Osim smanjenih troškova višestruka namjena služi za opskrbu vodom, obranama od poplava, zaštiti od erozije zemlje, navodnjavanju i odvodnji i gospodarsko – turističkim potrebama. Sustav elektrana ima daljinsko upravljanje – centar proizvodnje Sjever, s ciljem optimalne proizvodnje energije i optimalnog upravljanja. [3]

Tablica 4. Osnovni podatci o hidroelektranama u slivu rijeke Drave [3]

Višenamjenska HE	Raspoloživa snaga hidroelektrane [MW]	Neto pad [m]	Površina sliva [km ²]	Prosječna godišnja proizvodnja [GWh]
HE Varaždin	94,64	22	15 379	450 [27]
HE Čakovec	77,44	17,5	15 632	350 [28]
HE Dubrava	79,78	18	15 981	350 [29]

2.5.2. Hidroelektrane u slivu rijeke Kupe

Hidroelektrane u slivu rijeke Kupe nalaze se na rijekama Kupica, Dobra, Korana, Mrežnica i Glina. Područje rijeke Kupe ima veliki potencijal hidroenergije te se razmatralo o izgradnji čak dodatnih 26 postrojenja. Osim jednonamjenskih postrojenja značajnu ulogu u ovom kraju ima višenamjensko postrojenje zbog smanjenja rizika od poplava, npr. vodoprivredna – energetska stepenica Brodarica na rijeci Kupi i vodoprivredna – energetska stepenica Lučica na rijeci Korani. Zanimljivo je da se u ovom slivu nalazi najstarija HE koja još uvijek proizvodi električnu energiju HE Ozalj iz 1908. godine. [3]

Tablica 5. Osnovni podatci o hidroelektranama u slivu rijeke Kupe [3]

Hidroelektrana	Raspoloživa snaga hidroelektrane [MW]	Neto pad [m]	Instalirani protok [m ³ /s]	Srednja godišnja proizvodnja [GWh]
HE Ozalj	5,5	9,7	85	23,9
HE Gojak	57	105	50	195,4
HE Zeleni vir	1,8	50	4,4	/
HE Lešće	42,5	38,15	60	/
mHE ⁶ Ilovac [30]	1,209	2,82	19	/

2.5.3. Hidroenergetski sustav (HES) u slivu rijeka Lokvarke i Ličanke

Posebnost ovoga HES-a je u korištenju velikih visinskih razlika između slivnog područja vodotoka i strojarnice. Jedna od mana koja sprječava optimalni rad sustava su relativno male količine vode, odnosno velike oscilacije u protocima na godišnjoj razini. Tehničko rješenje

ovog sustava je u spoju dva akumulacijska jezera, Lokvarka i Bajer, i derivacijskog voda do strojarnice u Vinodolu. Vode nakon korištenja u sustavu se odvođe u Jadransko more. Ukupna godišnja proizvodnja ovog sustava je 142 GWh. [3]

Tablica 6. Osnovni podatci o HES-u u slivu rijeka Lokvarke i Ličanke [3]

Komponente hidroenergetskog sustava	Raspoloživa snaga hidroelektrane [MW]	Neto pad [m]	Instalirani protok [m ³ /s]	Srednja godišnja proizvodnja [GWh]
HE Vinodol	91,5	645,5	18,6	137
CHE Fužine	6	49	9,9	2,92
HE Lepenica	1,1	12,22	6,2	2,73

2.5.4. Hidroelektrana na Rječini

Hidroelektrana na rijeci Rječini ima bruto pad od 228 m i instalirani protok od 21 m³/s. Zaprema vode za potrebe dnevnog reguliranja protoka je 470 000 m³ što tvori bazen s gravitacijskom branom visine 35,5 m. Srednja godišnja proizvodnja, mjerena između 1981. i 2019. godine, je 85 GWh. Hidroelektrana radi s dvije Francis turbine. [3]

2.5.5. Hidroenergetski sustav u slivu rijeka Lika i Gacka

Kako bi rad HES-a bio moguć potrebno je bilo izvršiti prespajanjem sustava kanala i tunela s pripadajućim objektima na dijelovima sliva rijeke Like prema rijeci Gacki kako bi zajedno utjecale u kompenzacijski bazen. Zajednički se rijeke koriste na padu od Gusić polja do Jadranskog mora, 437 m, za HE Senj. [3]

Tablica 7. Osnovni podatci o HES-u u slivu rijeka Lika i Gacka [3]

Komponente hidroenergetskog sustava	Raspoloživa snaga hidroelektrane [MW]	Neto pad [m]	Instalirani protok [m ³ /s]	Srednja godišnja proizvodnja [GWh]
HE Senj	216	60	60	972
HE Sklope	22,5	410	45	85

2.5.6. Hidroenergetski sustav u slivu rijeke Krke

Hidroenergetski potencijal područja rijeke Krke iskorištava se od kraja 19. stoljeća kada je postavljena prva HE, HE Jaruga. Prva HE koristila je pad od 10 m na jednoj turbini. Veliki potencijal područja zajamčen je brojnim pritocima. [3]

Tablica 8. Osnovni podatci o HES-u u slivu rijeke Krke [3]

Komponente hidroenergetskog sustava	Raspoloživa snaga hidroelektrane [MW]	Neto pad [m]	Instalirani protok [m ³ /s]	Srednja godišnja proizvodnja [GWh]
HE Golubić	7,5	59	14	20
mHE ⁶ Krčić	0,35	37,3	1	2
HE Miljacka	24	102	32,2	116
HE Jaruga	7,3	24,5	31	28

2.5.7. Hidroenergetski sustav u slivu rijeke Cetine

Hidroenergetski potencijal rijeke Cetine je značajan, razlog tome je gotovo 4160 km² površine sliva Cetine. Sliv rijeke Cetina ima velike oscilacije u protoku koje se kreću između 7,4 m³/s i 415 m³/s. Pouzdano se može zaključiti da je najveći potencijal Cetine u donjem toku. [3]

Tablica 9. Osnovni podatci o HES-u u slivu rijeke Cetine [3]

Komponente hidroenergetskog sustava	Raspoloživa snaga hidroelektrane [MW]	Neto pad [m]	Instalirani protok [m ³ /s]	Srednja godišnja proizvodnja [GWh]
HE Peruća	61,2	47	120	130
HE Orlovac	237	380	70	340
HE Đale	40,8	21	220	157
HE Zakučac	576	250,4	240	1445
HE Kraljevac	4,8	108,9	55	55

⁶ mHE – Mala hidroelektrana

2.5.8. Hidroenergetski sustav u slivu rijeke Trebišnjice

Hidroenergetski sustav obilježen je velikom promjenom razine vode u ovisnosti o godišnjim dobima. Primjerice prosječne padaline iznose oko 1780 mm godišnje. Međutim u sušnim razdobljima oskudica vode može potrajati prosječno i 20 dana. Višenamjenski HES na rijeci Trebišnjici dijeli se između dvije države Republike Bosne i Hercegovine i Republike Hrvatske – regija Dubrovnik. Hidroenergetski sustav je višenamjenski (poljoprivreda i energetika) za koji je planirana izgradnja sedam HE s pet akumulacijskih jezera. Hidroelektrana Dubrovnik koristi vodu iz donje akumulacije HE Trebinje kao svoje gornje akumulacijsko jezero koje je ostvareno gradnjom brane Gorica. Kompenzacijski bazen, ulazna građevina i dio dovodnog tunela nalazi se u Republici Bosni i Hercegovini, dok se ostali dijelovi postrojenja nalaze u Republici Hrvatskoj. Kako se za potrebe proizvodnje električne energije u HE Dubrovnik koriste vodni resursi druge države jedan agregat je spojen na 110 kV mrežu (Republika Hrvatska), a drugi na 220 kV (Republika Bosna i Hercegovina) također sva proizvedena energija se dijeli između Republike Hrvatske i Republike Bosne i Hercegovine. [3]

Tablica 10. Osnovni podatci o HES-u u slivu rijeke Trebišnjice [3]

Komponente hidroenergetskog sustava	Raspoloživa snaga hidroelektrane [MW]	Neto pad [m]	Instalirani protok [m ³ /s]	Srednja godišnja proizvodnja [GWh]
HE Dubrovnik	252	275	105	1566
HE Zavrelje	1,9	75,8	3	4,6

2.6. Male hidroelektrane u Republici Hrvatskoj

Neke od mHE navede su u prijašnjim poglavljima. Dodatno kako bi se objedinili podatci o mHE u Republici Hrvatskoj napravljena je Tablica 11 za 2020. godinu.

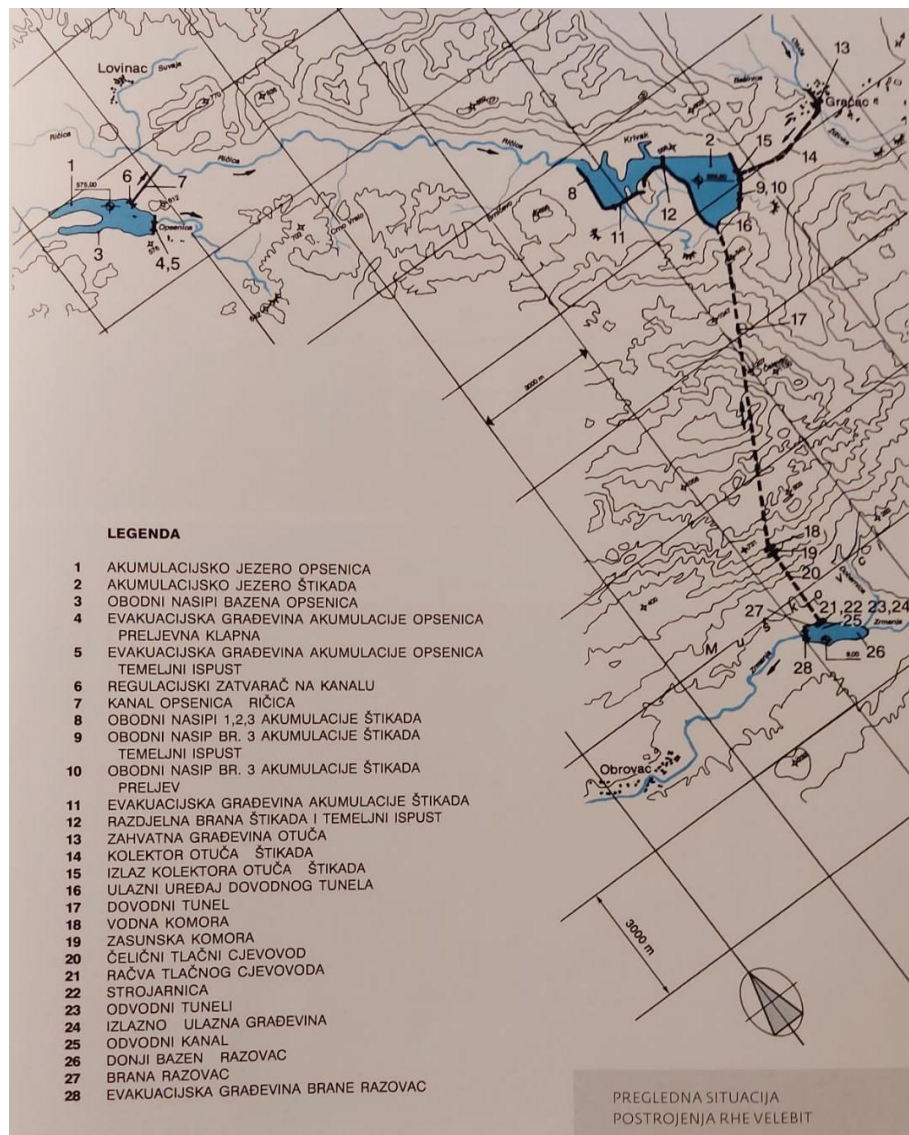
Tablica 11. Male hidroelektrane u Republici Hrvatskoj [31]

Podatak o mHE		
Instalirana električna snaga	33	MW
Proizvodnja električne energije	102	GWh
Predano u mrežu tijekom 2020. godine	25 000 222	kWh
Isplaćena sredstva osnove isplate poticaja povlaštenim proizvođačima u 2020. godini	25 488 907,76	HRK

2.7. Opis odabrane hidroelektrane u Hrvatskoj – RHE Velebit

Odabrana RHE nalazi se na rijeci Zrmanji u Zadarskoj županiji, 10 km od Obrovca. Hidroelektrana na Velebitu je reverzibilna hidroelektrana (RHE). Jedna od najvećih prednosti RHE je to što, osim sustava rada za proizvodnju energije (prolaz kroz turbine), ima i sustav u kojemu za vrijeme viška energije, najčešće noću, radom pumpe vraća vodu iz donjeg u gornje akumulacijsko jezero. Reverzibilna hidroelektrana za proizvodnju električne energije koristi rijeke i vodene tokove u Gračačkom polju: Opsenica, Ričice, Otuče, rijeka Zrmanja i potok Krivka. [32]

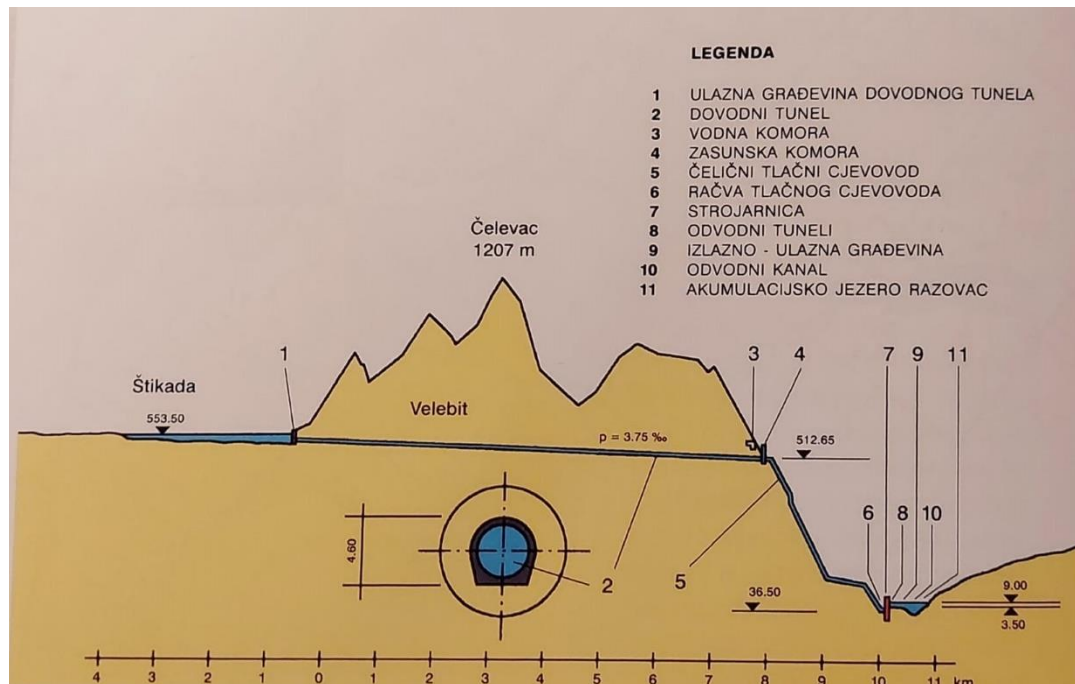
S hidro – građevinskog pregleda RHE se može podijeliti na: (1) gornja akumulacijsko jezero – jezero Štikada; (2) tlačni dovodni sustav; (3) strojarnica s pratećim objektima i donje akumulacijsko jezero – jezero Razovac. Akumulacijsko jezero (gornje jezero), obujma 13,65 hm³, smješteno je na Grčačkoj visoravni. Jezero je podijeljeno na dva dijela – gornji dio i donji dio što je idejni pokazatelj višenamjenske akumulacije. Ovo akumulacijsko jezero nema dvojnu namjenu iako je to zamišljeno u projektu, trenutno je neizvedeno. Prosječni godišnji dotok u jezero je 11,94 m³/s. [3] Pregled sustava RHE vidljiv je na Slika 7.



Slika 7. Pregledna situacija postrojenja RHE Velebit [3]

Sustav rada RHE započinje odvodnjom vode do strojarnice kroz betonski tlačni tunel i čelični tlačni cjevovod. Dovodni tunel je promjera 4,6 m i dužine 8191 m, a na početku tunela se nalazi sustav s tablastom zapornicom dimenzija 5 x 6,4 m. Vodne komore se nalaze na kraju tunela čiji su osnovni dijelovi vertikalni šaht i dvije bočne komore. Leptirasti zatvarač nalazi se na prijelazu iz dovodnog tunela u tlačni cjevovod promjera od 3 m do 3,9 m i dužine 2108 m. Visinska razlika koja se savladava u sustavu je 549,15 m, dok je sustav građen bez dilatacija i oslanja se na betonske oslonce preko kliznih ležajeva. Pred strojarnicom se cjevovodni sustav razdvaja na dva dijela prema dvjema turbinama. Postavljena su dva agregata koja su izvedena tako da zadovoljavaju sve režime rada. Uz turbinski i crpni režim ovaj sustav ima i kompenzacijski koji omogućava pomoćne usluge u EES-u. Kompenzacijskim režimom

osigurava se kompenzacija jalove snage i na taj se način održava napon, 400kV, na čvorištu RHE Velebit. Pokretanja agregata u crpnom pogonu izvodi se statičkim pretvaračem frekvencije s odvojenim radnim kolom hidrauličkog stroja. Postavljen je sinkroni motor u sustav. [3] Pregled hidro – građevinskog sustava vidljiv je na Slika 8.



Slika 8. Uzdužni presjek postrojenja RHE Velebit [3]

Osnovni tehnički podatci koji su kasnije korišteni i u optimizaciji pokazani su u Tablica 12.

Tablica 12. Osnovni tehnički podatci RHE Velebit [3]

RHE Velebit		
Energetski podatci	Najveći bruto pad	550 m
	Instalirani protok elektrane u turbinskom radu	60 m ³ /s
	Instalirani protok elektrane u crpnom radu	40 m ³ /s
	Prosječna godišnja proizvodnja	430 GWh
	Energetska vrijednost akumulacije (Štikada i Opsenica)	14,8 GWh
Podatci o opremi		
Turbina – crpka	Tip	Jednostepena turbina – crpka
	Broj turbina	2
	Konstruktivni pad turbine	517 m
	Konstruktivni napor crpke	559 m
	Snaga turbine	140 MW
	Instalirani protok turbine	2 x 30 m ³ /s
	Instalirani protok crpke	2 x 20 m ³ /s
Generator	Tip	Sinkroni generator -motor
	Broj generatora	2
	Snaga generatora	2 x 138 MW
	Snaga crpke	2 x 120 MW
	Srednji energetski ekvivalent	1,25 kWh/m ³
	Broj okretaja agregata	600 okr/min
Puštanje u pogon	1984. godine	

2.7.1. SWOT analiza reverzibilne hidroelektrane

Projektiranje RHE ovisi o različitim parametrima kao što su mogućnost izvedbe, postojanje akumulacija – mogućnost projektiranja akumulacije, visini investicije i ostalo. Kako bi se što jednostavnije prikazao potencijal RHE prikazana je SWOT analiza u Tablica 13.

Tablica 13. SWOT analiza RHE

Snaga (engl. <i>Strengths</i>)	Slabosti (engl. <i>Weaknesse</i>)
<ul style="list-style-type: none"> • Zbog načina rada osigurana je visina vode u akumulacijama • Tehnologija je ispitana • Društveno prihvaćena tehnologija • Mogućnost višestrukog iskorištavanja akumulacije • OIE 	<ul style="list-style-type: none"> • Visoki investicijski troškovi • Ovisnost o lokaciji • Kod nepravilnog rukovanja sa postrojenjem može doći do nedovoljnog iskorištavanja potencijala • Akumulacija mora biti prirodna ili lokacija mora imati mogućnost izgradnje akumulacije bez narušavanja prirodnog sistema
Prilike (engl. <i>Opportunities</i>)	Prijetnje (engl. <i>Threats</i>)
<ul style="list-style-type: none"> • Odličan sudionik na energetsom tržištu • Dugi vijek trajanja • Mogućnost hibridizacije sa drugim OIE • Mogućnost iskorištavanja akumulacija i u druge svrhe 	<ul style="list-style-type: none"> • Razdoblja suša kod otvorenog tipa RHE • Ne slaganje lokalne zajednice • Visoke cijene održavanja opreme • Zagađenje okoliša ili smanjenje kvalitete vode kod zatvorenog tipa

Pregledom SWOT analize može se zaključiti da je RHE Velebit prema pregledu dobro projektirana u skladu sa lokacijom. Utjecaj na okoliš je minimalan i lokalna zajednica je složna oko rada RHE. Razlog tome je dugogodišnji rad RHE u kojemu su se minimizirali svi negativni utjecaji. Mana RHE Velebit koju bi trebalo istaknuti neprovedeno iskorištavanje akumulacije i u druge svrhe. Prema vlastitom mišljenju autora ovoga diplomskog rada, da je RHE Velebit na lokaciji koja se dodatno može popularizirati uvođenjem dodatnih sadržaja pogotovo na gornjoj akumulaciji.

Hrvatska kao zemlja bogata je hidroenergijom čemu svjedoči veliki broj HE. Prema primjerima iz literature može se primijetiti da osim na kopnu u Hrvatskoj postoji potencijal izgradnje RHE i na otocima. Primjerice jedna od HE koja se može prenamijeniti u RHE je HE Vinodol dok se na otoku Krku može implementirati ova tehnologija u kombinaciji sa vodoopskrbom otoka. [33]

3. ANALIZA TEHNOLOGIJA U HIBRIDNOM SUSTAVU

3.1. Hibridizacija RHE i vjetroelektrane

Energetska tranzicija Kanarskih otoka predstavljena je strategijom RIS3 – „Regional Smart Specialization Strategy“ i regionalnim planovima za različite otoke. El Hierro je otok u skupini Kanarskog otočja koji je u strategiji postavlja cilj 100% samoodrživog otoka. Geografski gledano, El Hierro, ima visoki energetska potencijal za dobivanje energije iz vjetra, sunca i vode. Hibridni sustav vjetar – voda, sustav pod nazivom Gorona del Viento, ima za svrhu proizvodnju električne energije i čijim radom je projektirano pokrivanje 70% svih godišnjih energetska potreba na otoku. [34]

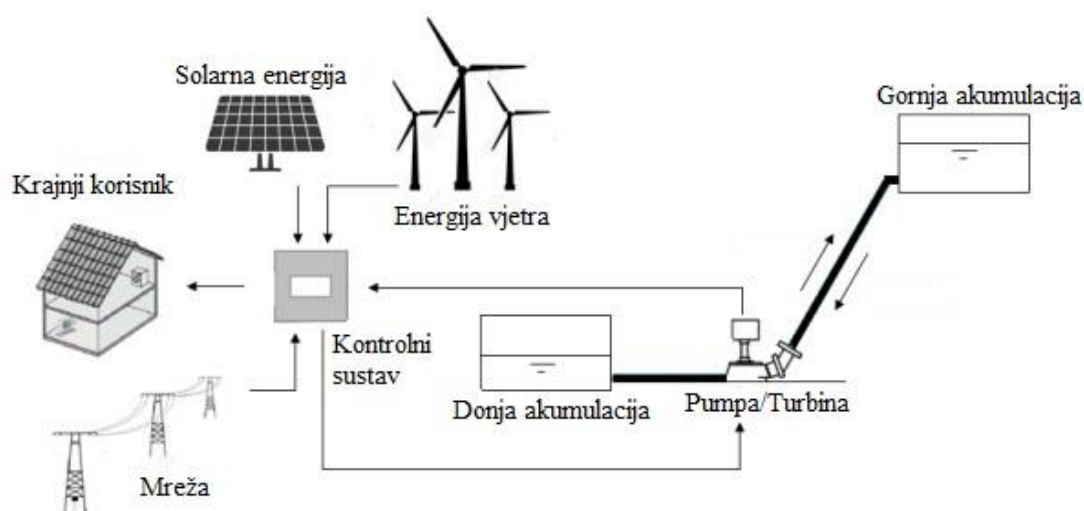
Vjetroelektrana proizvodi dio dnevnog zahtjeva za električnom energijom lokalnih potreba. Svi viškovi energije dobivene iz vjetra se koriste u svrhu pumpanja vode u gornju akumulaciju sa visinskom razlikom od 698 m. Proizvodnja energije iz RHE započinje u trenutku kada proizvedena energija iz vjetroelektrane ne zadovoljava trenutne lokalne potrebe. Zbog nepredvidivosti energije iz vjetra, sustav u elektrani koja se prije pogonila na dizel motor nije napušten. Razlog nenapuštanja takvoga sustava je u tome što ako se za vrijeme niskog vjetro – potencijala javi potreba za pumpanjem vode u gornju akumulaciju, uključuje se ovaj sustav kako bi se održala potreba elektroenergetske mreže.

Trenutne brojke pokazuju visoku iskoristivost OIE i to od 56,5%. Prema radnim satima u godini sustav je 2300 sati radio sa 100% OIE čime je smanjeno oko 20 000 t emisija CO₂/god, dok je potrošnja fosilnih goriva smanjena za 7000 t/god. Sustav je u javno privatnom vlasništvu te posjeduje potporu španjolske vlade kroz kapitalnu subvenciju i pomoć kod vraćanja prvotne investicije. [35]

3.2. Hibridizacija RHE, vjetroelektrane i solarne elektrane

Pregledom literature s tehničke strane sustav spajanja RHE i tehnologija OIE, u ovom slučaju vjetar i sunce, donose atraktivna energetska rješenja. Zbog nepredvidivosti OIE dinamički doprinos kod spajanja OIE donosi stabilnost proizvodnje energije. Studija koja se bavila proučavanjem kombinacije tehnologija pokazuje da ovakav hibridni sustav (vjetar – voda – sunce) bi mogao generirati i skladištiti električnu energiju po niskim cijenama i ostvariti smanjivanje emisija CO₂. Prilikom projektiranja ovakvoga sustava potrebno je obratiti pozornost na pravilno kombiniranje svih čimbenika kako bi rješenje bilo optimalno. Studija je proučavala neke od segmenata kao što su: (a) Korištenje pumpe i turbine u isto vrijeme što se

prema ulaznim parametrima pokazalo moguće. Kod korištenja jedne vodne cijevi za pumpu i turbinu potrebno je osigurati rad sustava u kojemu nakon operacije npr. pumpe slijedi operacija turbine i obratno.; (b) Projektiranje samog sustava kako bi se odabrala najbolja instalacijska snaga za pumpe i turbine prilikom kojih su se kombinirala preostala dva izvora (vjetar i sunce).; (c) Zadnja optimizacija temeljila se na mijenjanju kapaciteta vode za odabranu instalacijsku snagu RHE. Ova studija pokazala je da integriranjem i kombiniranjem različitih OIE u jednom sustavu doprinosi smanjenju tarifa električne energije, povećava sigurnost opskrbe energije iz OIE i pridonosi cilju pouzdanosti hibridno energetskih rješenja. [36] Sustav je prikazan na Slika 9.



Slika 9. Primjer hibridnog sustava RHE, vjetroelektrane i solarne elektrane [36]

3.3. Tehnologija FPV

Za tehnologiju koja će se proučavati u hibridnom sustavu sa RHE Velebit, odabrana je tehnologija koja je optimalni izbor iz primjera navedenih u prijašnjim poglavljima. Tehnologija odgovara već postojećem sustavu i prilikom postavljanja može ostvariti dodatne prednosti kod očuvanja okoliša. Time je odabrana tehnologija plutajućih solarnih panela (engl. *Floating solar panels* – FPV) kao idealno rješenje. Prednosti ove tehnologije u hibridnom sustavu su proizvodnja električne energije, iščezavanje intermitentnosti sustava FPV zbog energije koja se može koristiti pri radu hidroelektrane, proizvodnja energije u ljetnim mjesecima kada visoke temperature negativno utječu na proizvodnju energije iz sustava HE i smanjenje ishlapljivanje vodene površine gornje akumulacije jezera.

3.4. Tehnologija plutajućih solarnih panela (FPV)

Prema pregledu trenutnih projekata vidljivo je da se hibridni sustavi koji koriste FPV razlikuju prema instaliranoj snazi i lokaciji. Promatrani faktori kao što su utjecaj na okoliš, utjecaj na temperaturu solarnih panela, povećanje/smanjenje iskoristivosti HE i dr. također ovise o vrsti projekta i optimizaciji sustava pojedinog projekta. Maksimalna dobit za ovakve sustave proizlazi iz reguliranja osnovnih faktora, npr. energetske gustoće [W/m^2], optimizaciji sustava, odabiru prave lokacije i dr. Tablica 14. pokazuje SWOT analizu osnovnih karakteristika hibridnih sustava.

Tablica 14. SWOT analiza osnovnih karakteristika hibridnih sustava sa plutajućim solarnim panelima

Snaga (engl. <i>Strengths</i>)	Slabosti (engl. <i>Weaknesses</i>)
<ul style="list-style-type: none"> • Smanjuje korištenje korisne površine • Povećava energetske gustoću vodene površine • Dolazi do smanjenja ishlapljivanja vodene površine • Povećanje energetske efikasnosti panela • Usporava ili potpuno smanjuje rast algi 	<ul style="list-style-type: none"> • Tehnologija plutajućih solarnih panela je nedovoljno razvijena • Trenutno ne postoje usklađena istraživanja koja daju slične/iste karakteristike • Malen broj proizvođača panela i opreme za ovu tehnologiju • Potrebna je složena optimizacija sustava • Potrebno je proučiti tehnologije i odabrati optimalnu tehnologiju za lokaciju
Prilike (engl. <i>Opportunities</i>)	Prijetnje (engl. <i>Threats</i>)
<ul style="list-style-type: none"> • Povećava korištenje obnovljivih izvora energije • Moguća nadopuna energenata • Povećanje kvalitete energije • Prilikom instalacije moguće je koristiti već postojeću infrastrukturu • Tehnologija postaje ekonomski prihvatljivija sa većim brojem instalacija • Smanjenje temperature pritoka 	<ul style="list-style-type: none"> • Pri postavljanju tehnologije potrebna je preciznost, npr. određivanja točnog nagiba i azimuta za postavljanje panela, dobro usidravanje pontona i dr. • Ne usklađene zakonske regulative ovisno o državama • Moguća je loša optimizacija sustava

Bazna analiza pokazuje da se rizik za ovaj sustav temelji na novoj tehnologiji plutajućih solarnih panela. Nova tehnologija predstavlja svojevrsni rizik zbog manjka znanja i istraživanja o istima. Trenutno u akademskim krugovima postoji veliki broj istraživanja na temu hibridnih sustava prema kojima je napravljena i sljedeća Tablica 15 u kojoj su pokazane pretpostavke

empirijski dokazane (+), teorijske (T) i koje se nisu mogle ispitati niti potvrditi teorija o njima (N/A).

Tablica 15. Dobiveni rezultati prema pretpostavljenim tezama vezanim za hibridne sustave [37]

Pretpostavka	FPV	Hibridni sustav	Dobivene vrijednosti
<i>Povećanje iskoristivosti panela</i>	+	T	5-11%, 5°C
<i>Mogućnost gušćega postavljanja panela</i>	+	+	Pri nagibu od 8°
<i>Smanjenje zasjenjenja</i>	+	+	
<i>Smanjenje ishlapljivanja vodene površine</i>	T	T	50%, 70%, >90%, 680-1850 mm/god
<i>Smanjenje rasta algi i povećanje kvalitete vode</i>	T	N/A	
<i>Smanjenje temperature vode</i>	N/A	N/A	
<i>Korištenje panela prilikom sušnih razdoblja</i>	N/A	N/A	
<i>Smanjenje valova</i>	N/A	N/A	
<i>Smanjenje korištenja korisne gospodarske površine</i>	+	T	Omjer uštede zemljišta u odnosu na vodenu površinu 2,7:1 m ²
<i>Jednostavna instalacija sustava</i>	+	+	
<i>Smanjena potreba za građevinskom pripremom</i>	T	T	
<i>Povećanje životnog vijeka trajanja</i>	N/A	N/A	
<i>Korištenje već postojeće infrastrukture</i>		T	
<i>Poboljšanje korištenja energije</i>		T	Sva proizvedena energija u hibridnom sustavu u potpunosti se može iskoristiti, slanjem u mrežu ili za rad hidroelektrane [38]

Svaka od navedenih činjenica u Tablica 15 proučena je prema već postojećim studijama. Najraširenija teza za FPV govori o povećanju iskoristivosti panela zbog prirodnog hlađenja.

Konstrukcija instalacije dopušta strujanje zraka između i ispod panela na pontonima, koje kao rezultat ima povećanje iskoristivosti. Zbog smanjenih utjecaja gubitaka u sustavima koji su postavljeni na vodenu površinu povećava se proizvedena električna energija. Utjecaj temperature na FPV sustave proučavan je u Americi – Kalifornija, Italiji i Španjolskoj gdje su dobiveni rezultati bili 5-11% povećanje proizvedene energije zbog prirodnog hlađenja panela. Druga teza koja se javlja u gotovo svakom istraživanju je smanjenje ishlapljivanje zbog pokrivenosti vodene površine sustavom. Pretpostavka je u malom broju radova kvantificirana, dok se većina radova bavi teorijskim objašnjenjem ove teze. Postoje četiri načina prema kojima se može provjeriti ova teza: (1) korištenje već postojećih modela prema kojima se može procijeniti utjecaj postavljenog sustava na smanjenje ishlapljivanje vodene površine, (2) postavljanje na lokaciju sustav prikupljanje podataka (npr. razina vode, temperatura zraka i jezera, brzina vjetrova i sl.) i sustavom pokrivanja površine u svrhu proučavanja karakteristika jezera i ishlapljivanja vodene površine (sustav zasjenjenja), (3) primjena tradicionalnih metoda proučavanja ishlapljivanja i (4) postavljanjem sjenila na vodenu površinu u stvarnoj veličini željenog sustava. Istraživanja se provode na sva četiri načina, jedno od njih je iskorišteno za usporedbu ishlapljivanja potpuno pokriveno i nepokriveno vodene površine. Rezultati 8 mjesечноg istraživanja su pokazali da pri 95% pokrivenosti vodene površine ostvaruje smanjenje ishlapljivanja za 90%. Iako je ovo istraživanje pokazalo pozitivne rezultate, daljnja istraživanja morat će potvrditi ovu tezu. Smanjeno ishlapljivanje vodene površine ima direktan utjecaj na povećanje iskoristivosti HE. Smanjenje rasta algi i utjecaj na ekološki sustav jedino su proučavane u teorijskom obliku – ove teze morat će se proučavati kod već postavljenih sustava. [37]

3.4.1. Izvedbe projekta postavljanja plutajućih solarnih panela

Prije početka postavljanja FPV-a na željenu lokaciju projekt je poželjno podijeliti u faze: [38]

1. Konceptualna faza u koju ulaze odabir lokacije, izrada studije izvodljivosti (engl. *Feasibility study*), tehnološko – ekonomske analize i tehnički dizajn projekta; [38]

Konceptualna faza osmišljena je na način da se kroz nju prolaze svi osnovni parametri koji će doprinijeti kvaliteti projekta. Prvi parametar koji je potrebno ispitati je lokacija. Potrebni podaci o lokaciji su: geografski položaj, solarna iradijacija, klimatski utjecaj, izgled i dostupnost površine vodene površine, vrsta vodene površine, dubina vodene površine, ponašanje vodene površine (povećanja i smanjenja vodostaja, valovi, mijene, utjecaj promjene

godišnjih doba, zaleđivanje, presušivanje i dr.), batimerija, utjecaj okoline na vodenu površinu (kojim postotkom je zasjenjenost vodene površine tijekom dana, kakva je kvaliteta tla obzirom na lokaciju i okolinu te kakva je kvaliteta tla vodene površine), ostale karakteristike zemljišta, utjecaj na okoliš, parametri kod postavljanja (pristup mreži i lokacija trafostanice) i pravni parametri (pravni pristup, dozvole i propisi). Zasebno svaki od parametara može se promatrati prema parametru većeg i manjeg utjecaja, što je vidljivo iz Tablica 16.

Tablica 16. Tablica parametara utjecaja kod konceptualne faze [38]

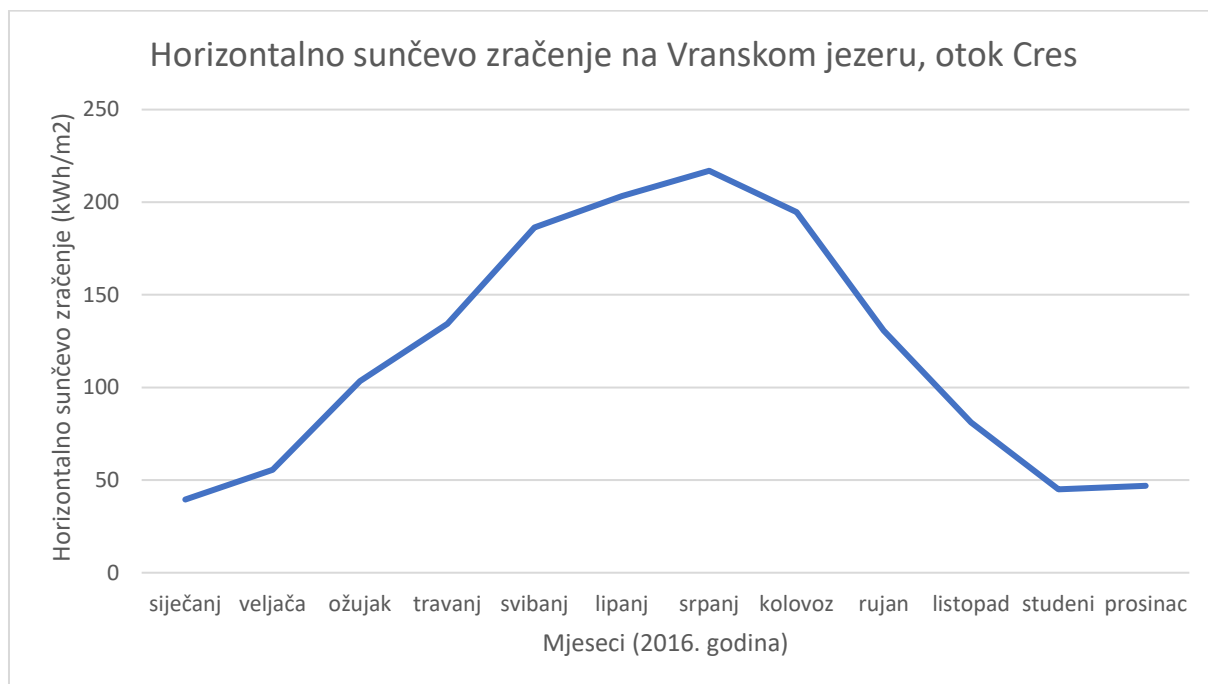
Faktor	Parametar većeg utjecaja	Parametar manjeg utjecaja
Lokacija	<ul style="list-style-type: none"> • Blizina naseljenih područja i trafostanice • Blizina i laka dostupnost prometnice • Osigurano i ograđeno područje • Blizina proizvodnih pogona ili luka za pojednostavljenu logistiku 	<ul style="list-style-type: none"> • Udaljena lokacija sa visokim transportnim troškovima ⁷
Klimatske karakteristike lokacije	<ul style="list-style-type: none"> • Visoka iradijacija • Lokacija sa malo vjetra i/ili oluja • Mirna površina vodene površine • Suho podneblje gdje je bitna konzervacija vode 	<ul style="list-style-type: none"> • Hladna podneblja gdje dolazi do smrzavanja vodene površine • Jako vjetrovite lokacije sa rizikom prirodnih katastrofa, npr. tajfuni i tsunami • Sezonske poplave • Suše koje dovode do izlaganja vodenog korita

⁷ U pojedinim slučajevima FPV sustavi su bitni za udaljene lokacije

Vrsta vodene površine	<ul style="list-style-type: none"> • Umjetna jezera • Akumulacijska jezera HE • Industrijska vodena tijela, ribnjaci i postrojenja za pročišćavanje otpadnih voda • Vodene površine rudnika • Vodene površine za navodnjavanje • Vodena površina za pitku vodu 	<ul style="list-style-type: none"> • Prirodna jezera • Turističke lokacije ili lokacije za rekreiranje
Karakteristike vodene površine	<ul style="list-style-type: none"> • Pravilni oblik • Otvoreni oblik prema jugu (za sjeverne hemisferu) ili prema sjeveru (za južne hemisferu) 	<ul style="list-style-type: none"> • Lokacija između planinskih lanaca • Otok/ stijena/ određena prepreka na sredini vodene površine
Vlasništvo nad vodenom površinom	<ul style="list-style-type: none"> • Privatno vlasništvo – jedan vlasnik • Pravno vlasništvo 	<ul style="list-style-type: none"> • Više vlasnika • Individualni privatni vlasnici
Podvodni teren i karakteristike tla	<ul style="list-style-type: none"> • Mala dubina • Ravan teren • Tvrdo tlo za sidrenje • Vodeno dno očišćeno od kablova, cjevovoda ili drugih prepreka 	<ul style="list-style-type: none"> • Muljevito dno
Fizikalne karakteristike vode	<ul style="list-style-type: none"> • Slatka voda niske tvrdoće i saliniteta 	<ul style="list-style-type: none"> • Slana voda • Kemijske reakcije u vodi (npr. korodiranje određenih subjekata u vodi) • Voda sklona biološkoj proizvodnji algi i ostalih travki
Ostali parametri lokacije	<ul style="list-style-type: none"> • Postojeća infrastruktura (elektro, dalekovodi i dr.) • Jednostavan pristup vodenoj površini • Dovoljna površina zemljišta za postavljanje električne opreme • Mogućnost opskrbe lokacije (pumpe, pročišćavanje, elektronika) 	<ul style="list-style-type: none"> • Ne postojeća elektro infrastruktura • Teška dostupnost lokaciji • Visoko zasjenjenje • Obliznji izvor onečišćenja (npr. dimnjaci, postrojenja za energetske obradu otpada, kamenolomi)

Ekološki kriteriji	<ul style="list-style-type: none"> • Jednostavna robusna ekologija 	<ul style="list-style-type: none"> • Očuvano stanište • Česta aktivnost ptica • Vodene vrste osjetljive na temperaturu vode, otopljeni kisik i sunčevu svjetlost
-----------------------	---	---

Podatci iz Tablica 16. pokazuju koliko je bitno odrediti lokaciju prema željenim ishodima projekta. Prilikom odabira potrebno je također obratiti pozornost i na lokalnu zajednicu. Ako se za primjer uzme lokacija Vranskog jezera, otok Cres – Hrvatska koja je bitan izvor pitke vode na otoku. Tijekom dana dolazi do zasjenjivanja jezera zbog okolnih uzvisina. Maksimalno horizontalno sunčevo zračenje (engl. *Global horizontal irradiation*) u jednom mjesecu na lokaciji iznosi 216,97 kWh/m², dok je minimalno horizontalno sunčevo zračenje u jednom mjesecu na lokaciji 39,51 kWh/m² (Graf 6). [39]



Graf 6. Horizontalno sunčevo zračenje na Vranskom jezeru, otok Cres [39]

Specifično kod ove lokacije postavljanjem FPV sustava pretpostavlja se da bi došlo do smanjenja ishlapljivanja pitke vode, a proizvedena električna energija na lokaciji služila bi za energetske potrebe sustava pripreme vode. Primjerom se pokazuje da iako prema Tablica 16. konceptualne karakteristike pripadaju parametrima manjeg utjecaja za ovu lokaciju su to najbitniji parametri.

Studija izvodljivosti dio je konceptualne faze u kojoj je fokus na energiji koju je moguće dobiti iz sustava. Ovisno o vodenoj površini i lokaciji potrebno je definirati izlaznu snagu i gubitke sustava. Snaga sustava proporcionalno ovisi o ozračenosti panela koja se kasnije umanjuje za gubitke sustava, stoga postoji idealna izlazna snaga i realna izlazna snaga sustava. Podatke o solarnoj iradijaciji moguće je dobiti iz programa poput PVGIS. Skup podataka, za što bolje izračune, treba sadržavati: (1) izravno normalno zračenje, (2) difuzno horizontalno zračenje i (3) globalno horizontalno zračenje. Za obradu podataka postoje razni programi koji sa velikom točnošću određuju koliko je energije moguće dobiti iz željenog sustava. Programi su prvenstveno namijenjeni korištenju za solarne sustave postavljene na kopnenoj površini, ali također se mogu koristiti i za FPV sustave sa podešavanjem određenih gubitaka, npr. toplinski gubitci. Primjeri programa su: PVsyst, PVSol – Valentine Softwear, HelioScope i dr. [38] Gubitci koji se javljaju u sustavu su: gubitci zbog zasjenjivanja, toplinski gubitci, gubitci u kablovima, gubitci zbog lošeg postavljanja, gubitci zbog zaprljanosti i dr.

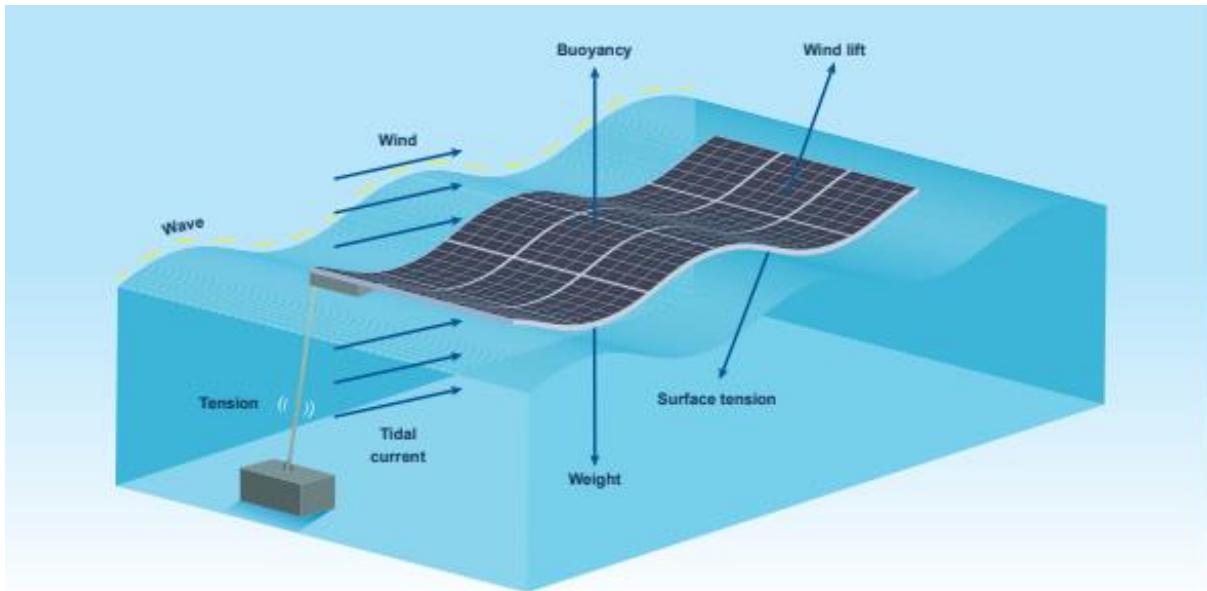
Tehnički dizajn projekta potrebno je napraviti u ovisnosti o lokaciji. Osnovna podjela projekta je na male, srednje i velike sustave. FPV sustavi postavljaju se na tri načina:

- a) **Iznad vodene površine** (pontonska konstrukcija – najčešće) – lokacija sustava u području umjerene vlažnosti zraka. Sustav ima prednosti hlađenja zbog ishlapljivanja vodene površine. Veliki sustavi gotovo se isključivo postavljaju na pontonske module koji nose solarne članke na bazi kristalnog silicija, osim modula sastavni dio sustava su inverteri i ožičenje.;



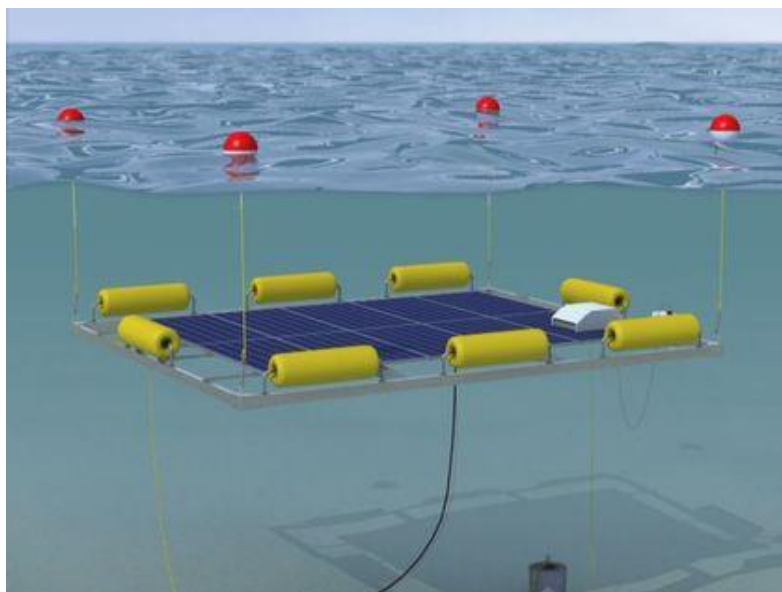
Slika 10. Pontonska konstrukcija sustava FPV [40]

- b) **Na vodenoj površini** (sustav sa fleksibilnim membranama) – lokacija sustava u području visoke vlažnosti zraka. Sustav ima prednosti hlađenja zbog ishlapljivanja vodene površine;



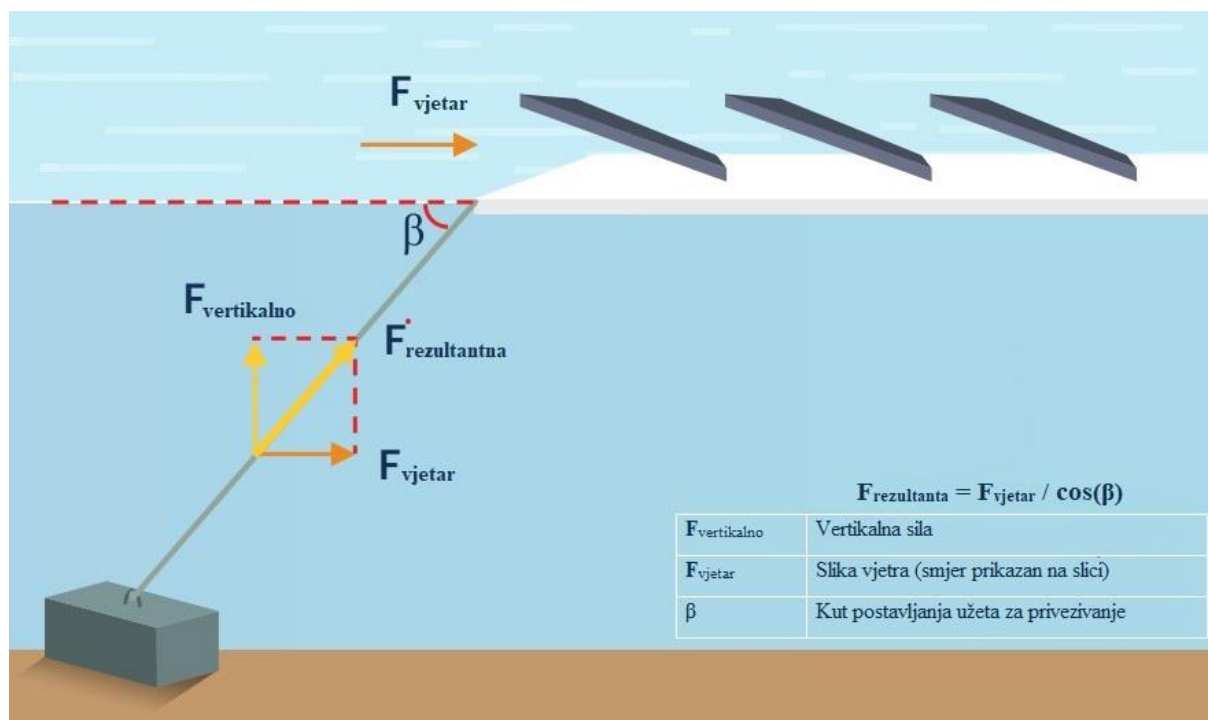
Slika 11. Shematski prikaz FPV sustav postavljenog na vodenoj površini [41]

- c) **Potopljeni sustav** - lokacija sustava u području zasićene vlage, potencijalno je moguće visoko hlađenje s prednje i stražnje strane panela, potencijalno može doći do samočišćenja, ali i formiranja bio staništa. [38]



Slika 12. Potopljeni sustav FPV [42]

Osim ovih modela, moguće je postaviti i sustav sa fleksibilnom membranom ili sustav sa samookretnim modulima. Pojedini autori ispituju postavljanje fotonaponskih modula na već postojeće pontonske konstrukcije. [38] Proračunate uvijete na gradilištu, klimatske uvijete, funkcionalnost sustava, vrstu i način sidrenja sustava, ekološke utjecaje i vođenje i održavanje sustava potrebno je također uzeti u obzir. Određeni faktori bitni su kako ne bi došlo do katastrofa poput potonuća sustava ili znatnog povećanja investicije projekta. Primjer proračuna sila pri naletima vjetra kako bi se odredili uvjeti sidrenja i postavljanja FPV-a, Slika 13.



Slika 13. Skica i formula izračuna sile u užetu za privezivanje [38]

Tehnološko – ekonomske analize pokazuju prve procijene isplativosti projekta na osnovi studije izvodljivosti i tehničkog dizajna projekta.

2. Studija društvenih parametara i studija utjecaja na okoliš; [38]

Studija društvenih parametara i studija utjecaja na okoliš ovise u potpunosti o konceptualnoj fazi. Uspješnost i prihvaćenost projekta temeljit će se na poštivanju zakona i propisa te načinu financiranja projekta uz primjenu najboljih tehnologija za tu lokaciju i poštivanja tehničkih propisa. Prilikom izrade projekta potrebno je izbjegavati negativni učinak koliko je god moguće, a nedostatke u konceptnoj fazi potrebno je razriješiti ili nadoknaditi.

3. Građevinski radovi – radovi na lokaciji, postavljanje projekta i dr.; [38]
4. Testiranje; [38]
5. Rad i održavanje sustava. [38]

Sustav FPV nakon postavljanja i testiranja zahtjeva minimalno održavanja i servisiranja. Očekivani životni vijek trajanja sustava je od 20 do 25 godina. Održavanje sustava temelji se isključivo na maksimizaciji proizvodnje električne energije uz minimiziranje troškova rada.

Aktivnosti potrebne za izradu ovakvog projekta velikim dijelom odgovaraju onima za PV položene na zemljanu površinu. Pregledom faza vezanih za FPV, može se zaključiti da veliki dio ovisi o dobroj definiciji i razradi konceptualne faze.

3.5. Hibridizacija reverzibilne hidroelektrane i plutajuće solarne elektrane

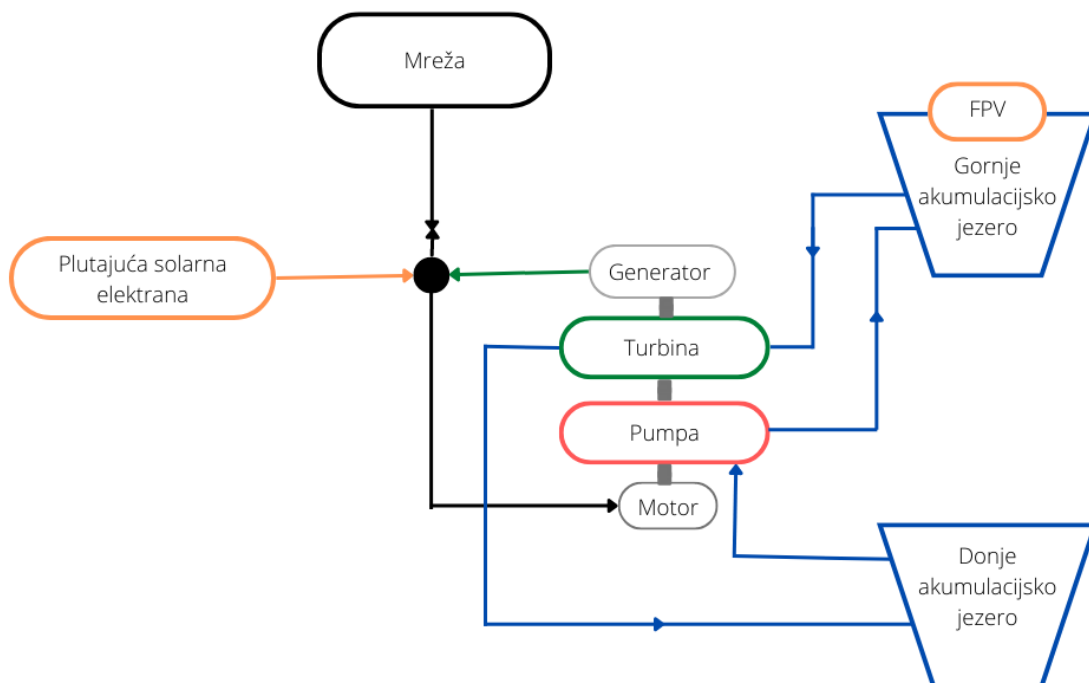
Za potrebe ovoga rada uzeti su u obzir svi čimbenici te na temelju njih odabrana je hibridizacija RHE i plutajuće solarne elektrane. Prema podacima iz literature veći broj čimbenika ukazuje na prednosti ovakvog hibridnog sustava: [43]

1. Već postojeći mrežni priključak – kako su HE već spojene na elektroenergetski sustav (EES), postavljanjem FPV-a ne predstavlja problem za spajanje na EES već se može iskoristiti već postojeća infrastruktura;
2. Odnosi izvora energije se dobro poklapaju – poznato je da HE zbog suše u ljetnim mjesecima proizvode manje energije, dok solarni sustavi zbog veće insolacije ljeti proizvode značajno više energije (Graf 6);
3. Sustavi plutajućih solarnih panela postavljaju se na vodenu površinu – jedan od velikih problema kod postavljanja solarnih elektrana je zauzimanje zemljišta. Kod postavljanja sustava FPV-a ne koristi se korisno zemljište niti dio jezera, ukoliko je višenamjensko akumulacijsko jezero, koji se koristi u neku drugu svrhu;
4. Postavljanje sustava – ovaj sustav je jednostavnije izgraditi, upravljati i po potrebi promijeniti lokaciju zato jer se nalazi na vodenoj površini, a vez je plutajući;

Uzevši u obzir podatke iz literature postavljene su pretpostavke koje su korištene u modeliranju sustava.

4. OPIS KORIŠTENE METODE

Cilj ovog rada je matematičkim modelom prikazati implementaciju nove tehnologije u postojeći sustav i optimizirati rad sustava s novom tehnologijom. Sustav FPV za potrebe ovoga zadatka postavljen je na gornjem akumulacijskom jezeru, jezero Štikada. Priključivanje sustava FPV radu RHE Velebit definira se matematički model koji za cilj ima maksimizirati funkciju cilja. Električna energija dobivena iz rada sustava FPV raspoređuje se na energiju potrebnu za rad pumpe u hidroelektrani ili se šalje u mrežu u ovisnosti o cijenama i drugim parametrima sustava. Prikaz koraka u modelu vidljiv je na Slika 14.



Slika 14. Shematski prikaz modela

Prema zadanim dimenzijama RHE Velebit, Tablica 12, uzeti su ulazni podaci koji se odnose na rad tehnologija unutar RHE. Na temelju svih ulaznih podataka formira se Excel tablica koja sadržava potrebne parametre na satnoj distribuciji od godine dana, odnosno za 8760 sati. Za potrebe izračuna korišten je programski jezik Python, a za potrebe optimizacije korišten specijalizirani softver za optimizaciju Gurobi.

Matematički model sastoji se od parametara, varijabli i ograničenja koje u kombinaciji služe za rješavanje zadane funkcije cilja. Tablica 17 daje pregled parametara korištenih u modelu.

Tablica 17. Pregled članova jednadžbi

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis
V_{lake}	m^3	Volumen jezera [1]
$V_{lake_{min}}$	m^3	Minimalni volumen jezera
$V_{lake_{max}}$	m^3	Maksimalni volumen jezera
A_{lake}	m^2	Površina jezera [1]
c_{sak1}	kWh/m^3	Srednji energetske koeficijent – turbina
c_{sak2}	kWh/m^3	Srednji energetske koeficijent – pumpa
V_{up1}	m^3/h	Volumen pritoka i odtoka gornjeg jezera
$A_{PV_{inst\ max}}$	m^2	Maksimalna površina instalacije – FPV
A_{pv}	m^2	Površina jednog odabranog PV modula [2]
$k_{FPV_{uk}}$	/	Koeficijent instalacije PV modula
P_{panel}	kWp	Izlazna snaga solarnog panela [2]
p	kWp/m^2	Omjer snage solarnog panela i površine solarnog panela
Sp	kW	Maksimalna snaga pumpe [3]
St	kW	Maksimalna snaga turbine [3]
C_{tp}	EUR/kWh	Veleprodajna cijena električne energije
C_{tk}	EUR/kWh	Maloprodajna cijena električne energije
Max_{hours}	h	Maksimalni broj sati rada sustava

E_{pv_p}	Wh/kWp	Proizvedena električna energija po snazi panela
------------	--------	---

Nakon definiranih parametara definiraju se ograničenja i varijable.

Model proizvodnje električne energije

Prolaskom vode kroz sustav hidroelektrane proizvodi se električna energija koja se potom šalje u mrežu te na tržištu ostvaruje cijenu određenu na satnoj distribuciji. Maksimalna moguća proizvedena energija u RHE definira se kao protok kroz turbinu u satu pomnožen sa srednjim energetske koeficijentom turbine. Proizvedena električna energija (E_H) modelirana je prema linearnom modelu zbog izrazite nelinearnog odnosa protoka, visine akumulacije, snage i efikasnosti u vremenu te zbog toga ovim pristupom dolazi do pogrešaka u modela. Međutim, linearnim modelom moguće je riješiti model linearnim programiranjem, vrijeme izračuna optimalnog rješenja je kraće i dolazi do ušteda na računalnim resursima. Podaci korišteni za srednji energetski koeficijent – turbina uzeti su prema podacima Hrvatske elektroprivrede.

$$E_H(t) = V_t(t) * c_{sak1} \quad (1)$$

Gdje je:

E_H – proizvedena električna energija [kWh],

V_t – protok vode kroz turbinu [m^3/h],

c_{sak1} – srednji energetski koeficijent – turbina [kWh/ m^3].

Maksimalni mogući protok vode kroz turbinu definiran je karakteristikama postojećeg sustava (Tablica 12). Kako se ovaj model ne bavi definiranjem novoga postrojenja potrebno je ograničiti vrijednosti protoka na satnoj razni po snazi turbine.

$$V_t(t) \leq V_{turbina} \quad (2)$$

$$V_{turbina} = \frac{St}{c_{sak1}} \quad (3)$$

Gdje je:

$V_{turbina}$ – maksimalni protok vode kroz turbinu [m^3/h],

St – maksimalna snaga turbine [kW].

Model pumpe

Osnovna razlika između rada pumpe i turbine je što pumpa koristi energiju kako bi protok za vrijeme niske potražnje za električnom energijom iz donjeg jezera pumpala u gornje jezero. Energija potrebna za rad pumpe definirana je kao satni protok pomnožen sa srednjim energetske koeficijentom pumpe. Električna energija potrebna za rad pumpe (E_p) modelirana je prema linearnom modelu zbog izrazite nelinearnog odnosa protoka, visine akumulacije, snage i efikasnosti u vremenu te zbog toga ovim pristupom dolazi do pogrešaka u modelu. Međutim, linearnim modelom moguće je riješiti model linearnim programiranjem, vrijeme izračuna optimalnog rješenja je kraće i dolazi do ušteda na računalnim resursima. Podaci korišteni za srednji energetske koeficijent – turbina uzeti su prema podacima Hrvatske elektroprivrede. Satni protok ograničen je maksimalnim mogućim protokom u pumpi koji je zadan prema postojećem sustavu.

$$E_p(t) = V_p(t) * c_{sak2} \quad (4)$$

$$V_p(t) \leq V_{pumpa} \quad (5)$$

$$V_{pumpa} = \frac{Sp}{c_{sak2}} \quad (6)$$

Gdje je:

E_p – električna energija potrebna za rad pumpe [kWh],

V_p – protok vode kroz pumpu [m^3/h],

c_{sak2} – srednji energetska koeficijent – pumpa [kWh/ m^3],

V_{pumpa} – maksimalni protok vode kroz pumpu [m^3/h],

S_p – maksimalna snaga pumpe [kW].

Ukupna električna energija na satnoj razini potrebna za rad pumpe preuzima se iz dva izvora: mreže i sustava FPV. Raspodjela omjera definirana je u optimizacijskom modelu prema ulaznim parametrima.

$$E_p(t) = E_{P_g}(t) + E_{P_{PV}}(t) \quad (7)$$

Gdje je:

E_{P_g} – električna energija potrebna za rad pumpe – preuzeta iz mreže [kWh],

$E_{P_{PV}}$ – električna energija potrebna za rad pumpe – preuzeta iz sustava FPV [kWh].

Model sustav FPV

Proizvodnja električne energije u sustavu FPV ovisi o insolaciji na površinu solarnih panela. Prema podacima preuzetim iz PVGIS – a za lokaciju jezera Štikada u vremenskom periodu između 2005. godine i 2020. godine [39], dobiveni su ulazni podatci o maksimalnoj mogućoj proizvodnji energije na lokaciji. Za potrebe sustava izabran je fotonaponski modul tvrtke SOLVIS [2] čiju je maksimalnu snagu potrebno svesti na m^2 (koeficijent p). Time je definirana električna energija koju je moguće proizvesti iz sustava FPV (jednadžba 8).

$$E_{PV}(t) = A_{pv} * p * E_{pv}(t) \quad (8)$$

Gdje je:

E_{PV} – električna energija proizvedena u sustavu FPV [kWh],

A_{pv} – površina odabranog fotonaponskog modula [m^2], [2]

p – omjer snage solarnog panela i površine solarnog panela,

E_{pv_p} – proizvedena energija po snazi panela [Wh/kWp].

Prema zahtjevima mreže i sustava RHE energija dobivena iz sustava FPV dijeli se na energiju potrebnu za rad pumpe i energiju koja se predaje u mrežu. Model je osmišljen da se ovisno o uvjetima na tržištu energije postavlja omjer kojim se energija dijeli između pumpe i mreže. Potrebno je definirati jednadžbu kojom se ukupna energija dobivena u sustavu FPV dijeli na energiju potrebnu za rad pumpe i energiju koja se šalje u mrežu. Za potrebe ovoga rada, pretpostaviti da elektroenergetska mreža je spremnik u koji se višak proizvedene energije iz sustava FPV može spremati te potom koristiti za potrebe EES – a.

$$E_{PV}(t) = E_{P_{PV}}(t) + E_{PV_g}(t) \quad (9)$$

$$E_{PV}(t) \leq E_{PV_{cap}} \quad (10)$$

Gdje je:

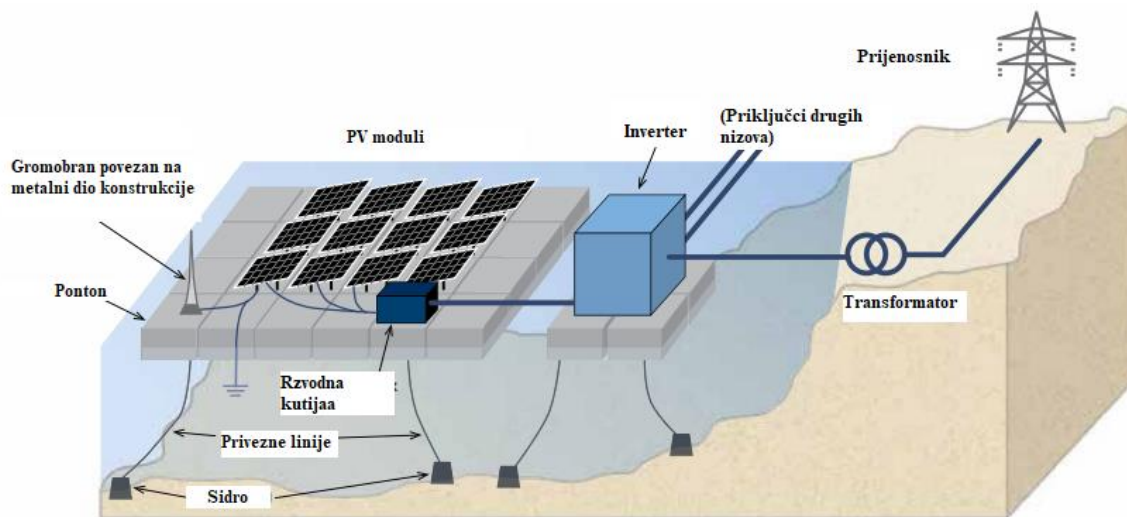
E_{PV_g} – električna energija iz sustava FPV predana u mrežu [kWh],

$E_{PV_{cap}}$ – kapacitet sustava FPV [kWh].

Model ishlapljivanja jezera

Slika 15 prikazuje sustav instalacije FPV – a. Vidljivo je da se paneli postavljaju na ponton koji je površinom veći od površine fotonaponskog modula te je potrebno uzeti u obzir razliku kako bi se odredila ukupna pokrivena površina. Geometrijskim odnosima dobiven je koeficijent, $k_{FPV_{uk}}$, koji pokazuje da je površina sustava, $A_{FPV_{uk}}$, 2,5 puta veća od površine fotonaponskih modula.

$$A_{FPV_{uk}} = A_{PV} * k_{FPV_{uk}} \quad (11)$$



Slika 15. Prikaz sustava FPV [44]

U teorijskom slučaju maksimalna moguća površina za postavljanje sustava FPV može biti jednaka površini jezera. Međutim, postavljanjem takvog modela potrebno bi bilo mijenjati geometriju modula te ju prilagođavati rubovima jezera, ali tada bi proizvedena električna energija i uštede kod ishlapljivanja bile maksimalne. Stoga je potrebno definirati ograničenje za promatranu površinu.

$$A_{FPV_{uk}} \leq A_{PV_{inst\ max}} \quad (12)$$

Čimbenici koji utječu na ishlapljivanje su vremenski uvjeti na lokaciji poput: temperature zraka, brzine vjetrova, relativne vlažnosti zraka i koeficijenta gubitaka zbog ishlapljivanja jezera. Svi podatci su uzeti iz PVGIS – a za lokaciju jezera Štikada u vremenskom periodu između 2005. godine i 2020. godine. [39] Model za izračun koristi Harbeckove jednadžbe. [45]

$$k_{evp} = N * u_2 * (es - ea) \quad (13)$$

Gdje je:

k_{evp} – satni gubitci zbog ishlapljivanja (mm/h) ,

N – koeficijent jezera Štikada, koji se u literaturi naziva koeficijent proporcionalnosti vezan je na procjenu ishlapljivanja. [46] Vrijednost koeficijenta izračunata je na 0,000081154.

u_2 - Brzina vjetra [m/s], [47]

es – tlak zasićene pare na površini jezera [kPa].

Tlak pare na površini jezera može se izračunati prema: [45]

$$es = 0,611 \exp\left(\frac{17,2T}{T + 237,3}\right) \quad (14)$$

gdje je ea tlak zasićene pare u zraku [kPa] koji se može izračunati prema: [45]

$$ea = \frac{RH}{100} es \quad (15)$$

T – temperatura zraka [°C], [47]

RH – relativna vlažnost, [47]

Satni volumen vode koja ishlapi na površini na koja je pokrivena sustavom FPV, može se izračunati prema:

$$V_{evap_{PV}}(t) = k_{evp} * A_{PV_{inst \max}} * \left(1 - 0,8 * \frac{A_{FPV_{uk}}}{A_{PV_{inst \max}}}\right) \quad (16)$$

Gdje je:

$A_{FPV_{uk}}$ – ukupna instalacijska površina sustava FPV [m²],

$V_{evap_{PV}}$ – prikazuje satni volumen koji ishlapi na promatranoj površini [m³],

$A_{PV_{inst\ max}}$ – maksimalna površina instalacije – FPV [m^2].

Prilikom pregleda literature zbog promjena na vodenoj površini, načina slaganja pontona, konstrukcijskog rješenja pontona (rupičasta površina) i spojnih elemenata uočeno je da 80% površine se spaja čvrstim spojem, dok je 20% spojeno labavim spojevima što omogućava ishlapljivanje vode na tim mjestima. Stoga je uvedena pretpostavka da 20% vodene površine ispod sustava FPV može ishlapati.

Kako bi se dobilo potrebno rješenje kolika je ušteda na promatranoj površini, potrebno je proučiti koliki volumen ishlapi kada je površina nepokrivena, što je moguće izračunati prema:

$$V_{evap_{bazno}}(t) = k_{evp} * (A_{lake} - A_{PV_{inst\ max}}) \quad (17)$$

Gdje je:

$V_{evap_{bazno}}$ – ishlapljeni volumen jezera na instalacijskoj površini bez sustava FPV [m^3],

A_{lake} – površina jezera [m^2]. [1]

Pritom se ukupna ušteda volumena, $V_{ušteta}$, koji nije ishlapio na promatranoj površini može se izračunati prema:

$$V_{ušteta}(t) = V_{evap_{bazno}}(t) - V_{evap_{PV}}(t) \quad (18)$$

Odnosno oduzimanjem od jednadžbe (17) jednadžbu (16).

Model napunjenost spremnika

Za vrijeme niskog zahtjeva za energijom voda se pumpa u gornje akumulacijsko jezero iz donjeg jezera i time gornje jezero predstavlja spremnik energije. Za modeliranje spremnika potrebno je definirati rubne uvijete koji su u skladu s prirodnim dotocima u jezero i koji sprječavaju potpuno isušivanje. Minimalni volumen vode u jezeru koji se može nalaziti u određenom satu iznosi 25% ukupnog volumena jezera. Uvjet za početak rada sustava je da se minimalno u nultom satu mora nalaziti 50% ukupnog volumena jezera dok u zadnjem satu volumen vode u jezeru mora biti veći ili jednak volumenu u nultom satu.

Ograničenja su postavljena prema:

$$V_{lake_{min}} \leq V_{lake}(t) \leq V_{lake_{max}} \quad (19)$$

$$V_{lake}(t = 0) = 0,5 * V_{lake_{max}} \quad (20)$$

$$V_{lake}(t = \text{Max}_{\text{hours}}) \geq V_{lake}(t = 0) \quad (21)$$

Gdje je:

V_{lake} – volumen jezera [m^3],

$V_{lake_{min}}$ – minimalni volumen jezera [m^3],

$V_{lake_{max}}$ – maksimalni volumen jezera [m^3].

Koja se definira prema:

$$V_{lake}(t) = V_{lake}(t = t - 1) + V_p(t) - V_t(t) + V_{up1}(t) - V_{evap_{bazno}}(t) - V_{evap_{PV}}(t) - V_{spill}(t) \quad (22)$$

Gdje je:

V_{lake} – volumen jezera [m^3],

V_p – protok vode kroz pumpu [m^3/h],

V_t – protok vode kroz turbinu [m^3/h],

V_{up1} – volumen pritoka i odtoka gornjeg jezera [m^3],

$V_{evap_{bazno}}$ – ishlapljeni volumen jezera na instalacijskoj površini bez sustava FPV [m^3],

$V_{evap_{PV}}$ – prikazuje satni volumen koji ishlapi na promatranoj površini [m^3],

V_{spill} – višak vode u jezeru [m^3] – volumen vode do kojega dođe u trenucima kada je jezero puno.

Binarne varijable

Rad sustava RHE potrebno je ograničiti kako se istovremeno ne bi odvijao rad pumpe i turbine. Takva ograničenja se postavljaju binarnom jednadžbom prema:

$$E_P(t) \leq Sp * x_p(t) \quad (23)$$

$$E_H(t) \leq St * x_t(t) \quad (24)$$

$$x_t(t) + x_p(t) \leq 1 \quad (25)$$

Gdje je:

E_P – električna energija potrebna za rad pumpe [kWh],

Sp – maksimalna snaga pumpe [kW],

x_p – binarna varijabla – pumpa,

E_H – proizvedena električna energija [kWh],

St – maksimalna snaga turbine [kW],

x_t – binarna varijabla – turbina.

Funkcija cilja

Funkcija cilja maksimizira novčanu dobit hibridnog sustava sačinjenog od RHE Velebit i FPV sustava postavljenog na jezeru Štikada. Za potrebe dobivanja što preciznijih rezultata i radi proučavanja sustava pri različitim cijenama definirana je funkcija cilja koja ima tri oblika koja se mijenjaju kroz scenarije.

1) Osnovna funkcija cilja (P1)

Definirana je osnovna funkcija cilja koja ima jednostavni bilančni model u kojem u svakom vremenskom trenutku dobitci sustava promatraju kao električna energija proizvedena iz sustava FPV i električna energija dobivena radom RHE, a umanjeni su za energiju potrebnu za rad pumpe. Kako se model bazira na financijskoj kvalifikaciji članovi se množe s veleprodajnim cijenama električne energije prema satnoj distribuciji.

$$\max\left(\sum_0^{8760} \left(\left(E_{PV}(t) + E_H(t) - E_{Pg}(t) \right) * C_{tp}(t) \right) - E_{PVcap} * C_{FPV} * CR \right) \quad (26)$$

Maksimizirani iznos se umanjuje sa cijenom investicije projekta hibridizacije gdje je:

E_{PV} – električna energija proizvedena u sustavu FPV [kWh],

E_H – proizvedena električna energija [kWh],

E_{Pg} – električna energija potrebna za rad pumpe – preuzeta iz mreže [kWh],

C_{tp} - Veleprodajna cijena električne energije [EUR/kWh]

E_{PVcap} – kapacitet sustava FPV [kWh],

C_{FPV} – investicija sustava FPV koji iznosi 1230 EUR/kW [48],

CR – povrat kapitala (engl. *Capital Recovery*) koji se može izračunati prema:

$$CR = \frac{disc_{rate}}{1 - (1 + disc_{rate})^{-invest_{year}}} \quad (27)$$

gdje je:

$invest_{year}$ – broj godina ulaganja, za potrebe zadatka iznosi 25 godina,

$disc_{rate}$ – diskontna stopa, za potrebe zadatka iznosi 6%.

2) Prošireni funkcija cilja sa različitim cijenama (P2)

Proširenu funkciju cilja s različitim cijenama karakteriziraju različite maloprodajne (C_{t_k}) i veleprodajne (C_{t_p}) cijene implementirale u sustav.

$$\max \left(\sum_0^{8760} E_{PV}(t) * C_{t_k}(t) + \sum_0^{8760} E_H(t) * C_{t_p}(t) - \sum_0^{8760} E_{Pg}(t) * C_{t_k}(t) - E_{PVcap} * C_{FPV} * CR \right) \quad (28)$$

3) Proširena funkcija cilja sa unovčenom uštedom vode (P3)

Proširenu funkciju cilja sa unovčenom uštedom vode karakterizira dodavanje još jednog člana na strani dobiti, odnosno kvantificiranje ne ishlapljene vode jezera na promatranoj površini. Za potrebe ovog zadatka uvedena je pretpostavka da cijena vode iznosi 3 EUR/m³, C_w .

$$\max \left(\sum_0^{8760} E_{PV}(t) * C_{t_k}(t) + \sum_0^{8760} E_H(t) * C_{t_p}(t) - \sum_0^{8760} E_{Pg}(t) * C_{t_k}(t) + \sum_0^{8760} C_w * \left(k_{evp}(t) * A_{PVinst\ max} - V_{evapPV}(t) \right) - E_{PVcap} * C_{FPV} * CR \right) \quad (29)$$

5. REZULTATI I DISKUSIJA

U sklopu diplomskog rada napravljena je detaljna analiza sustava. Praćeno je više faktora kako bi se promotrili svi čimbenici koji posredno mogu djelovati na rad sustava. Prethodno objašnjeno, napravljene su tri varijacije funkcije cilja. Glavnu razliku između pojedinih slučajeva predstavlja financijski model otkupa i prodaje električne energije. Cijene na tržištu podložne su naglim promjenama te prilikom analize problema potrebno je uzeti to u obzir.

Prema lokaciji sustava, potrebno je pronaći optimalni kut pri kojemu se proizvodi maksimalna električna energija iz sustava FPV. Dobivenim optimalnim kutom ulazi se u daljnji proračun u kojemu se uspoređuju karakteristike sustava ovisno o postavljenoj funkciji cilja, kao što su analiza osjetljivosti promijene instalacijske cijene sustava FPV, analiza ishlapljivanja vode u ovisnosti o površini i promjene razine vode gornjega spremnika.

U dijelu rezultati uvedene su oznake koje opisuju scenariji pojedine funkcije cilja, tako je:

- P1 – Osnovna funkcija cilja,
- P2 – Prošireni funkcija cilja sa različitim cijenama,
- P3 – Prošireni funkcija cilja sa unovčenom uštedom vode.

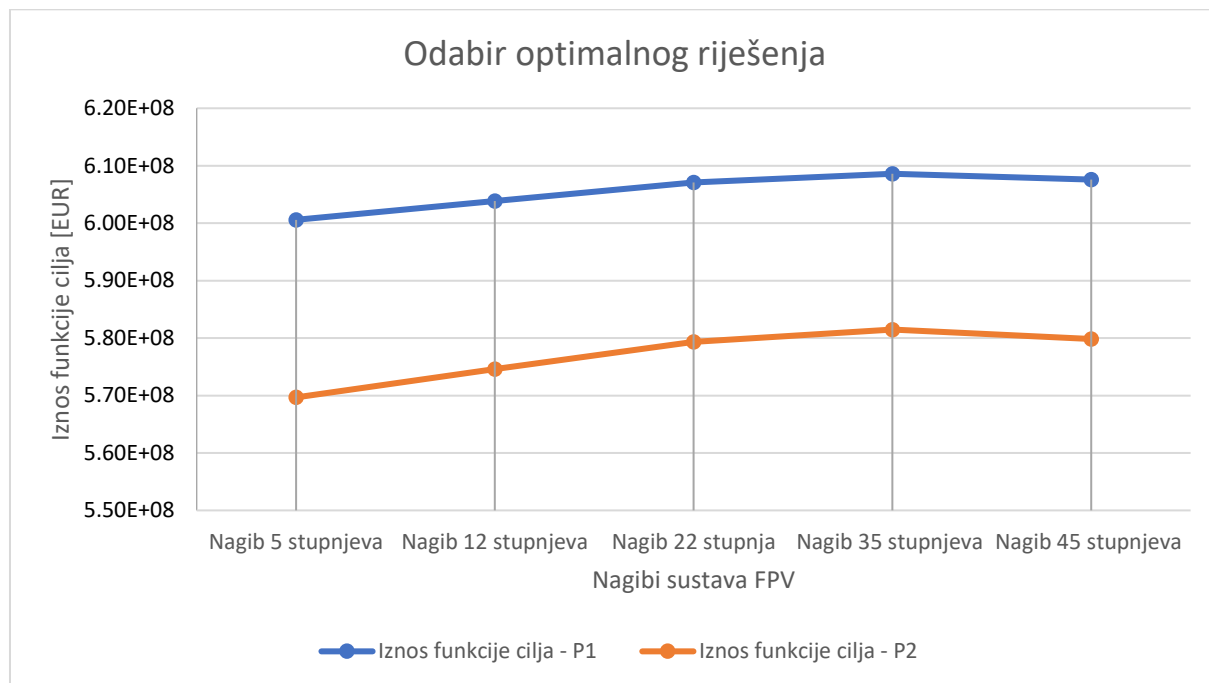
Referentni model napravljen je sa P1 scenarijem dok su ostali scenariji (P2 i P3) uspoređivani sa referentnim scenarijem. Razlog zbog kojega je za referentni scenariji odabran P1 je dostupnost podataka. Dobiveni ulazni podatci su za veleprodajnu cijenu električne energije za 2018. godinu sa CROPEX – a. Pregledom trenutnog stanja na tržištu električne energije cijene, koje iznose prosječno između 300 i 400 EUR/MWh, kreirani su scenariji u kojima je veleprodajna cijena što realnije prikaz trenutnog stanja na tržištu. Maloprodajne cijene su uvećane za 1,5 puta što odgovara visini troška distribucije i transporta električne energije. Razlog promjena cijena je kako bi se sustav proučio u što realnim uvjetima rada.

5.1. Odabir optimalnog rješenja

Prilikom postavljanja sustava FPV potrebno je odrediti optimalni kut postavljanja. Danas postoje alati kojima se određuje optimalni kut instalacije u ovisnosti o lokaciji. U radu je korišten jedan od alata PVGIS iz kojega su prikupljeni ulazni podatci. Međutim, kako se rad bazira na hibridnom sustavu potrebno je uzeti u obzir sve čimbenike sustava i dati pregled rješenja. U obzir je uzeto 5 različitih nagiba solarnog panela: 5°, 12°, 22°, 35° i 45°. Dobivena

rješenja optimizacijom analizirana su prema rezultatima prema maksimalnoj instaliranoj snazi sustava FPV, maksimalnoj površini sustava FPV i prema iznosu funkcije cilja.

Prva analiza napravljena prema opisanim segmentima za P1 i P2, Graf 7.

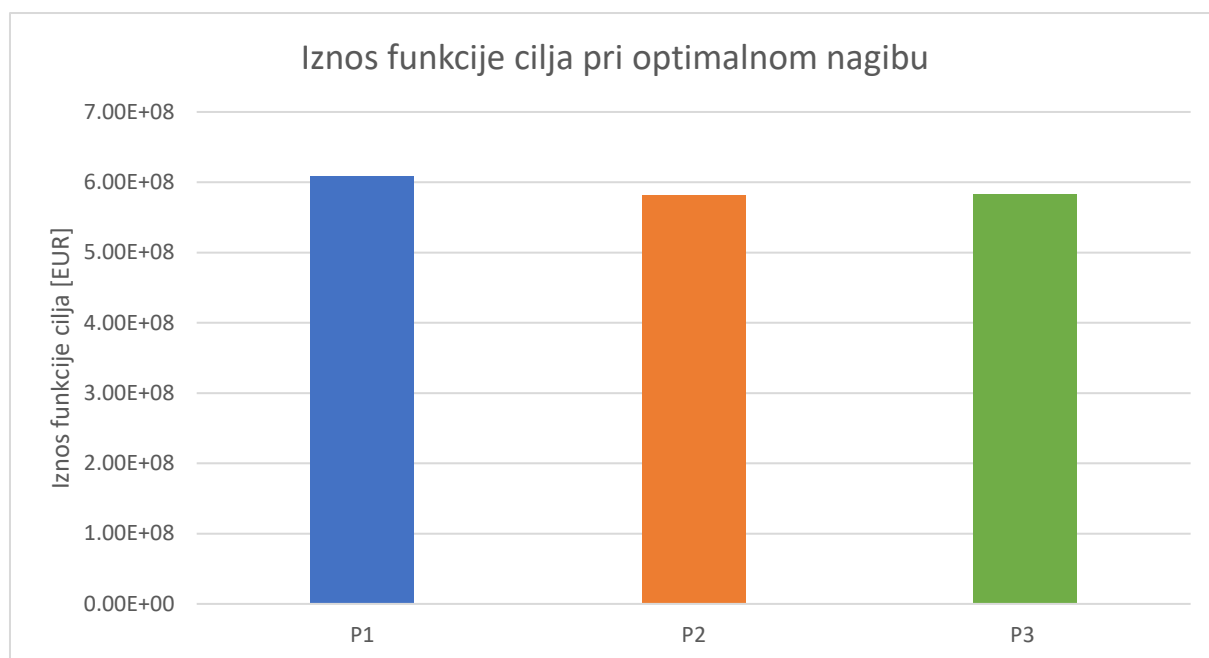


Graf 7. Odabir optimalnog rješenja

Graf 7 prikazuje da se pri nagibu od 5° ostvaruje najmanja vrijednost funkcije cilja za P1 i P2, dok se za 35° ostvaruje maksimalna vrijednost. Nagib od 35° odgovara optimalnom nagibu dobivenom iz alata PVGIS. Također, može se primijetiti da razlika u iznosu funkcije cilja za 22° i za 45° je skoro zanemariva u odnosu na optimalni kut od 35° . Postotno gledano ta razlika iznosi za 22° 0,25% , dok za 45° 0,16%. Ovaj podatak nam pokazuje da ako dođe do promjene razine vode, poremećaja na površini vode i sl., može dovesti do ne namjerne promjene kuta konstrukcije. Sustav će i dalje ostvarivati približno jednaku vrijednost maksimalne vrijednosti funkcija cilja određenoj pri optimalnom kutu.

Prema prvoj analizi odabran je nagib od 35° kao optimalni kut instalacije solarnih panela na lokaciji.

Druga analiza odabranog optimalnog kuta instalacije solarnih panela daje pregled iznosa funkcija cilja za P1, P2 i P3. Iz Graf 8, iznos funkcija cilja P2 u odnosu prema referentnom razlikuje se za 4,46%, a za P3 4,17%. Razlika naspram P1 nastaje zbog manjeg broja radnih sati sustava RHE u P2 i P3, Tablica 18.



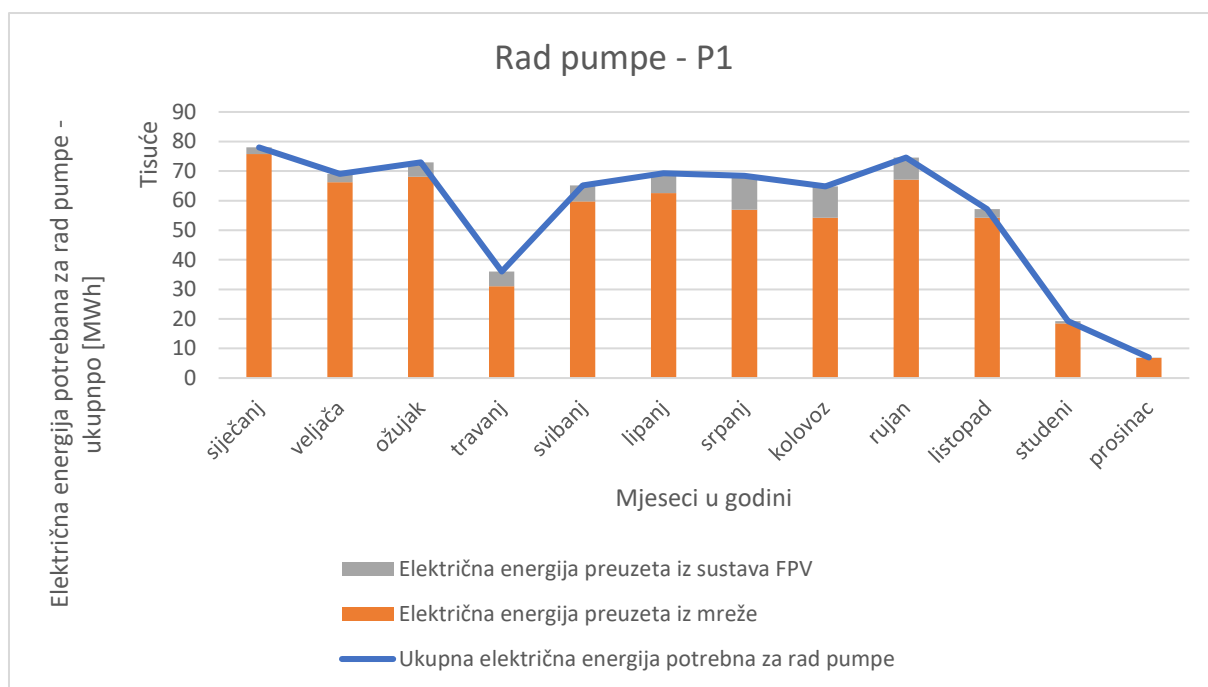
Graf 8. Iznos funkcije cilja pri optimalnom nagibu

5.2. Analiza dobivenih rezultata za hibridni sustav pri optimalnom kutu - P1, P2, P3

Provedena je analiza za referentni model u kojoj je napravljen pregled najznačajnijih karakteristika sustava a to su: rad pumpe, rad turbine i rad sustava FPV.

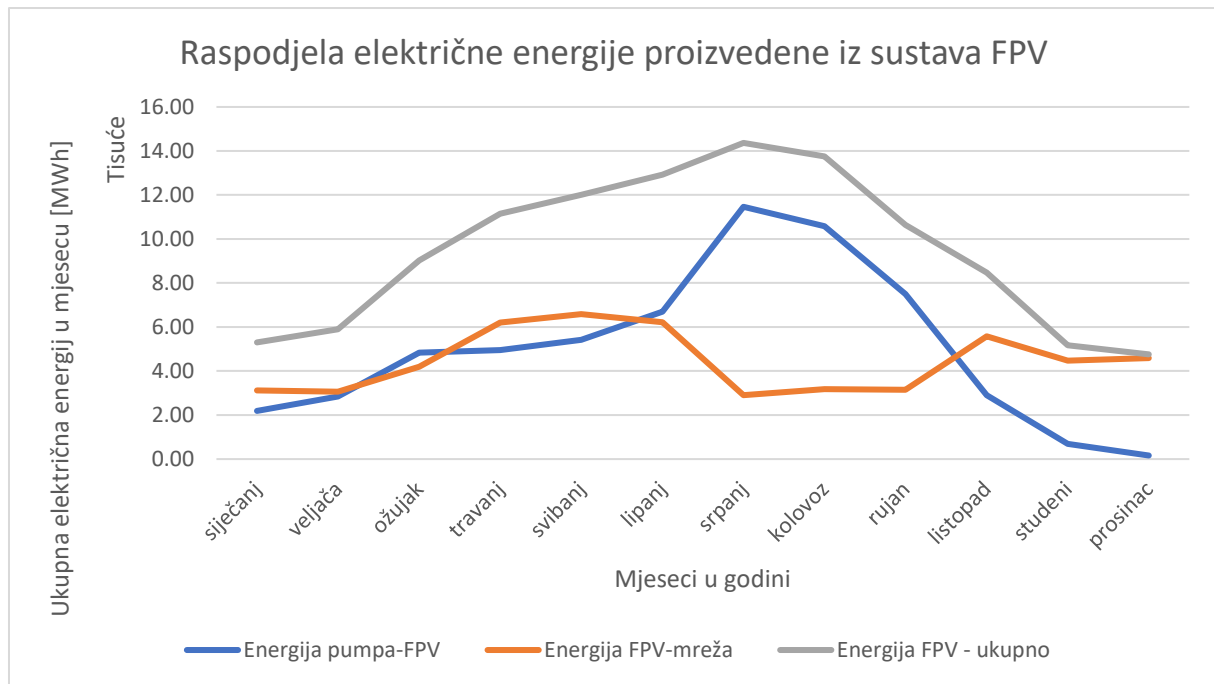
U referentnom modelu pumpa je u promatranom razdoblju svoj maksimum postigla ukupno 2659 sati. Minimum, odnosno stanje isključenosti za ovaj model ostvaren je 4956 puta što je 56% promatranog vremenskog perioda od godinu dana. Prema opisanom modelu za potrebe rada pumpe električna energija se preuzima iz mreže i sustava FPV (Graf 9). Prema istom grafu vidljivo je u mjesecima siječanj, listopad, studeni i prosinac da pumpa uzima nezatni dio energije potrebne za rad iz sustava FPV odnosno oko 2%, dok je prosječno 8% doprinosa sustava FPV za rad pumpe. Drugi razlog smanjene mogućnosti preuzimanja električne energije iz sustava FPV u tim mjesecima je zbog manjeg broj sunčanih sati u zimskim mjesecima (Graf 14).

Prema dobivenim rezultatima može se zaključiti da pumpa većinski preuzima električnu energiju iz mreže zbog veće isplativosti u cijenama u trenutcima rada i da je većinu godine u stanju mirovanja.



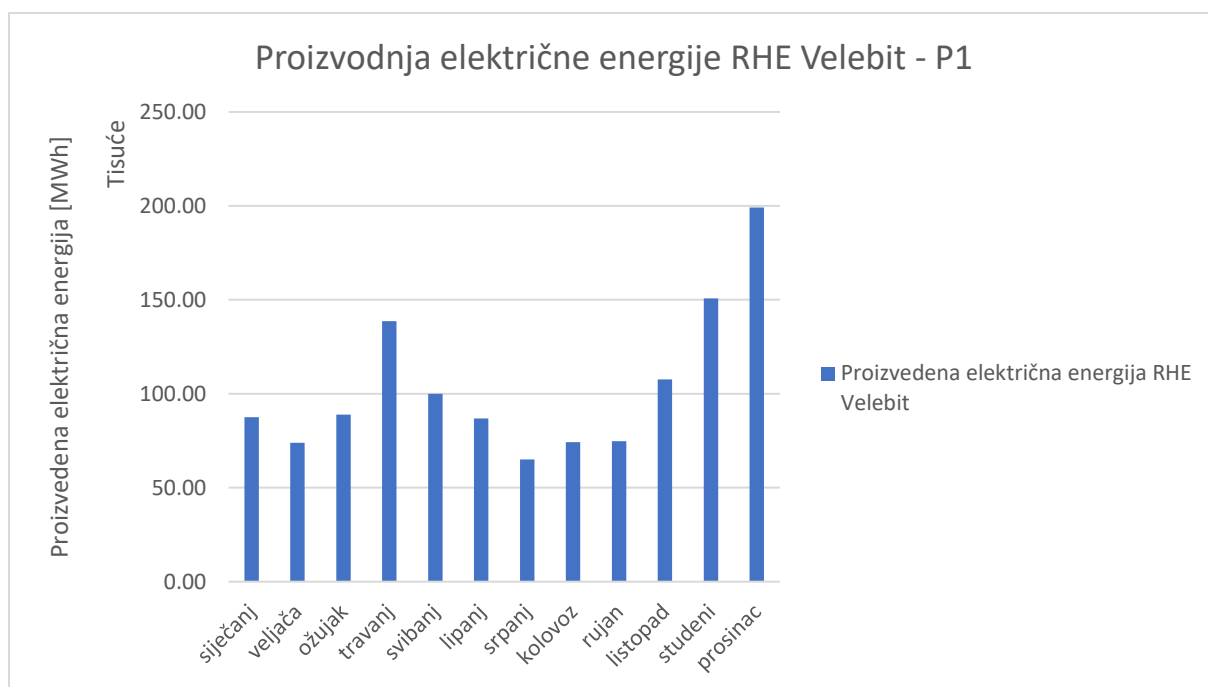
Graf 9. Rad pumpe - P1

Jezero Štikada ukupne je površine 3,34 km² što uvelike ograničava moguću instalacijsku površinu. Za potrebe zadatka nakon geografski promatranog jezera zaključeno je da je dostupna instalacijska površina od 1 km² što je 30% ukupne površine. Zbog male površine jezera nije moguće povećati površinu sustava FPV kako bi se proizvodnja električne energije povećala i time značajnije doprinijela radu pumpe. Prema dobivenim podacima sustav FPV predaje u potpunosti proizvedenu električnu energiju pumpi 72% vremena u godini prikazano u Graf 10.



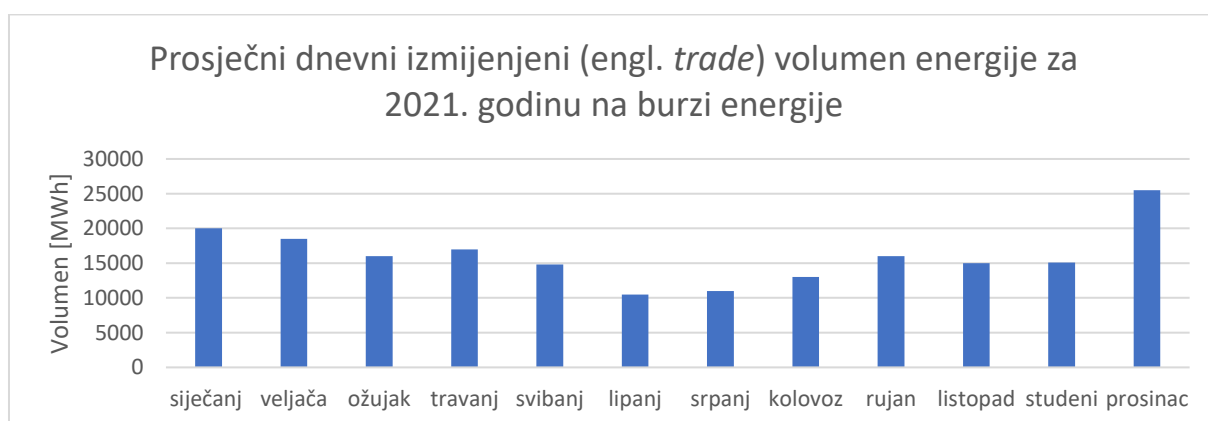
Graf 10. Raspodjela električne energije proizvedene iz sustava FPV

Maksimiziranjem rada sustava postavlja se pretpostavka u kojoj turbina kao i pumpa mogu raditi na maksimalnom kapacitetu u bilo kojem trenutku kako bi se funkcija cilja maksimizirala. Međutim u stvarnosti to nije slučaj nego se rad turbine optimizira prema zahtjevima mreže i dolazi do manjeg broja vršnih vrijednosti rada turbine. Prema dobivenom modelu turbina je na maksimalnom proizvodnom kapacitetu radila 51% promatranog vremena.



Graf 11. Proizvodnja električne energije RHE Velebit P1

Točnost modela i pretpostavke na samom modelu mogu se uočiti usporedbom sa godišnjim prodanim mjesečnim volumenom na Hrvatskoj burzi energijom – CROPEX i dobivenoj proizvodnji modelom RHE Velebit (Graf 11). Prodani volumen (Graf 12) pokazuje veću prodaju u mjesecima kada se prema modelu proizvodi i veća količina energije u sustavu RHE Velebit.

Graf 12. Prosječni dnevni izmijenjeni (engl. trade) volumen energije za 2021. godinu na burzi energije⁸ [49]

⁸ Graf 14 je napravljen prema okvirnim brojkama očitanim iz CROPEX godišnjeg izvješća za 2021. godinu.

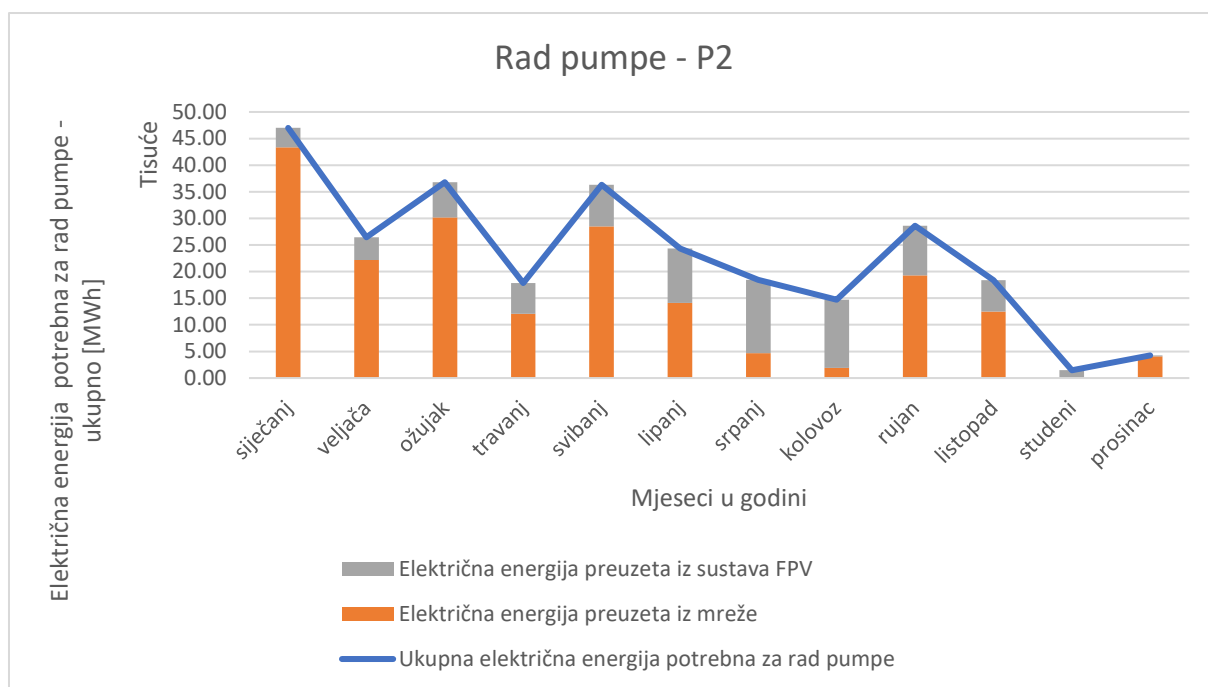
Ukupno vrijeme kada za model nije optimalna proizvodnja niti iz jednog izvora iznosi 481h odnosno 5% ukupnog promatranog vremena.

Usporedbom P1, P2 i P3 vidi se značajna razlika u radu sustava. Iznos funkcije cilja P2 je manji od iznosa funkcije cilja P1 i P3, ali električna energija se unutar sustava drugačije raspoređuje. Glavni razlog tome su što sustav P2 ima različite maloprodajne i veleprodajne cijene i time model na drugačiji način osigurava optimalno poslovanje. Primjerice pumpa i turbina manje puta dosežu maksimalni mogući kapacitet. Međutim, u P2 i P3 pumpa i turbina imaju manji broj radnih sati u kojima ne rade što za posljedicu ima i manji iznos funkcije cilja. P2 i P3 imaju jednake karakteristike rada, Tablica 18.

Tablica 18. Usporedni elementi rada sustava P1 i P2

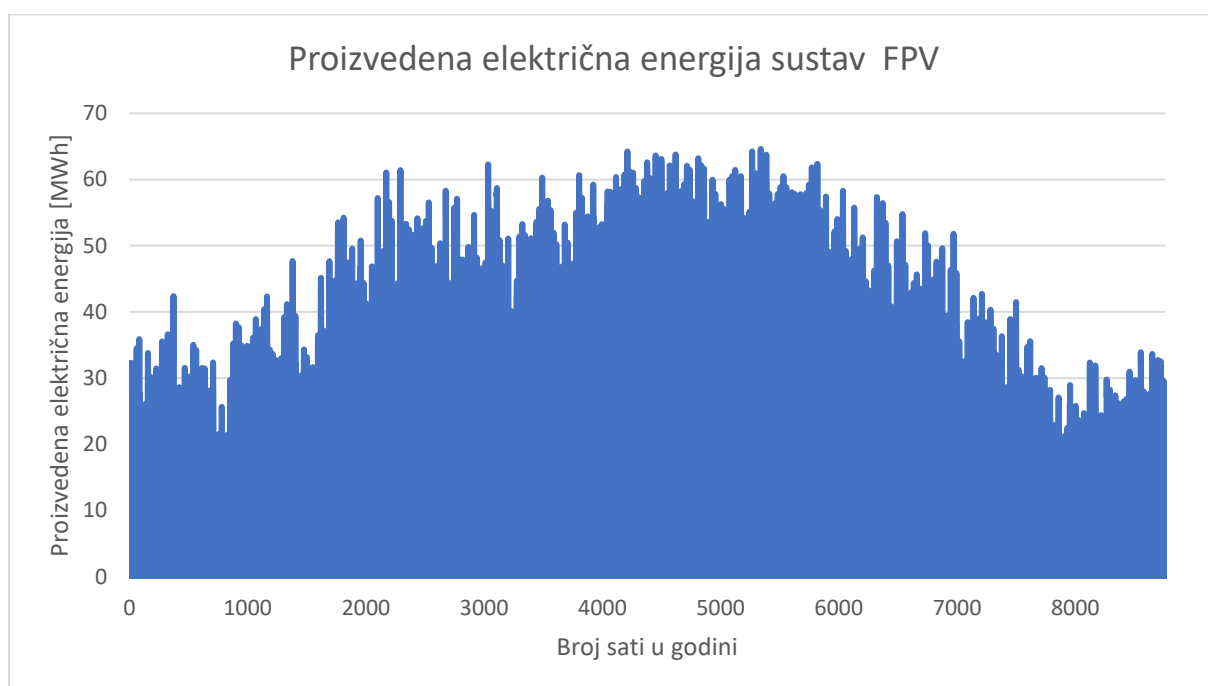
Usporedni element	P1	P2 i P3
Broj sati u kojima pumpa doseže maksimalni proizvodni kapacitet	2659	823
Broj sati u kojima turbina doseže maksimalni proizvodni kapacitet	4439	3133
Broj sati u kojemu ne radi sustav RHE Velebit	481	2209
Broj radnih sati – pumpe	3804	3374
Broj radnih sati – turbine	4475	3117

Sustav FPV u P2 drugačije raspodjeljuje proizvedenu električnu energiju. Razlog tome što se električna energija potrebna za rad pumpe se preuzima iz mreže, a cijene su znatno veće za energiju koja je kupljena od prodane. Odnosno čak se 39% potreba za rad pumpe preuzima iz sustava FPV, Graf 13. Podatak za studeni u P2 slučaju pokazuje da električna energija potrebna za rad pumpe nije preuzeta iz mreže nego je u tom mjesecu rad pumpe zasnovan samo na električnoj energiji preuzetoj iz sustava FPV. Većinski dio potrebne električne energije za rad pumpe u kolovozu i srpnju također se preuzima iz sustava FPV.



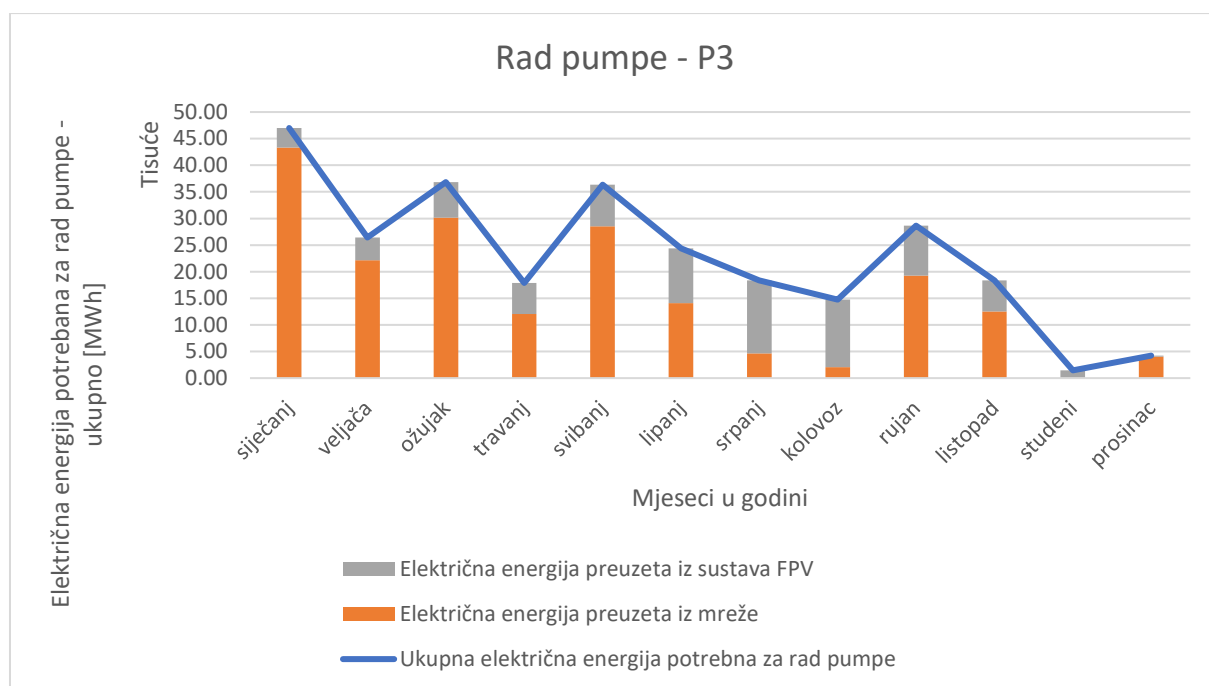
Graf 13. Rad pumpe - P2

Usporedno sa cijenama na tržištu električna energija proizvedena u sustavu FPV za P2 teži prodaji u mrežu. Model cijenu električne energije dobivene iz FPV računa prema maloprodajnoj cijeni zato jer je to iznos koji sustav mora otkupiti iz mreže za rad pumpe. Sustav FPV na ovoj lokaciji proizvodi najviše električne energije u ljetnim mjesecima (Graf 14) a u tim mjesecima se postižu znatno veće maloprodajne cijene električne energije.



Graf 14. Proizvedena energija sustav FPV

Pregledom karakteristika u radu obzirom na drugačije funkcije cilja P2 i P3 imaju isti broj radnih sati pumpe i turbine, ali električna energija potrebna za rad pumpe se drugačije raspoređuje između mreže i sustava FPV, Graf 15. U odnosu na P1 u P3 su definirane različite maloprodajne i veleprodajne cijene. Razlika u odnosu na P2 je u tome što u P3 vrednujemo ne ishlaplenu vodu u gornjem jezeru, time sustav FPV donosi 2 značajne dobiti funkciji cilja. Cjenovno vrednovanje vode temelji se na pretpostavci da voda koja nije ishlapila sačinjava dodatni tok kojim je moguće proizvoditi električnu energiju. Zbog vrednovanja vode u P3, funkcija cilja ima veću vrijednost od funkcije cilja u P2, Graf 8.



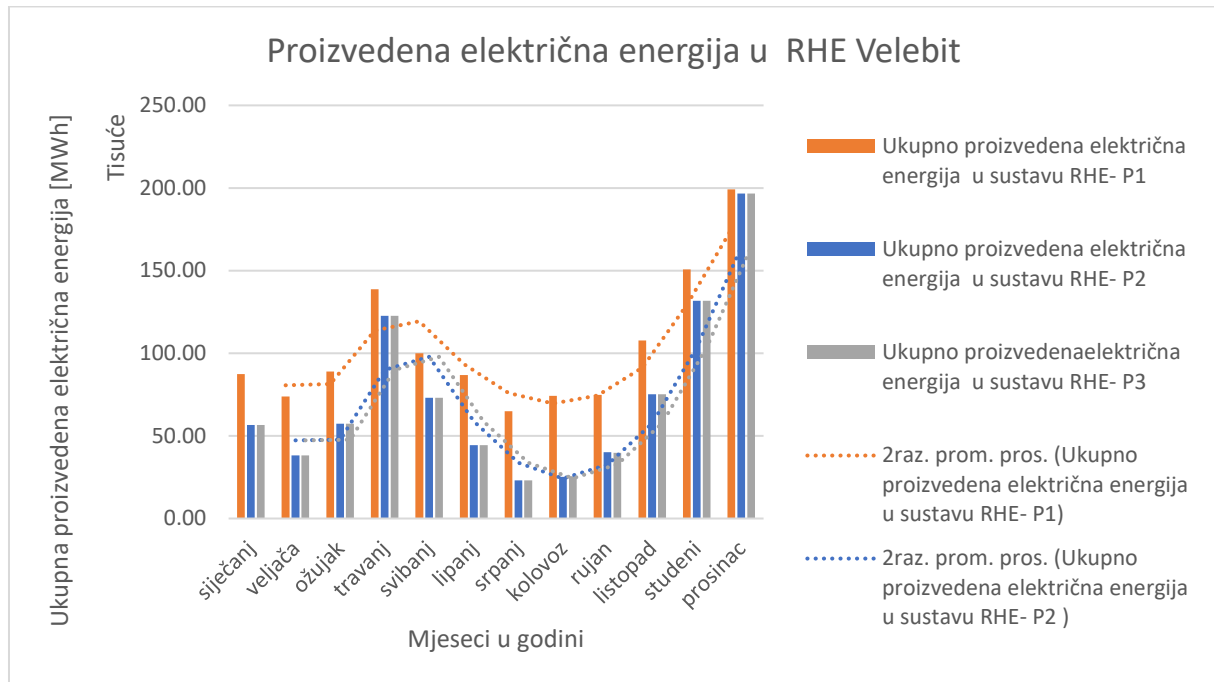
Graf 15. Rad pumpe - P3

5.3. Grafička usporedba rada P1, P2 i P3 za RHE Velebit

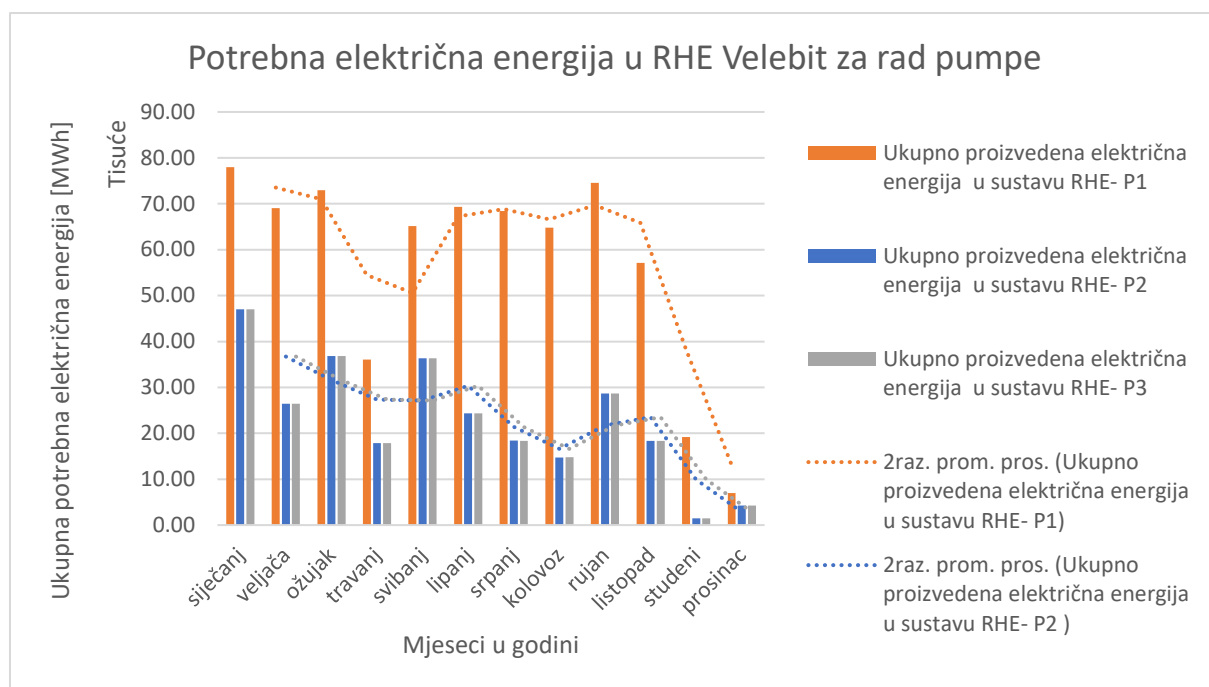
Za potrebe ovoga rada, grafičkim prikazom Graf 16 i Graf 17 prikazana je potrebna i proizvedena električna energija u RHE Velebit. Maksimiziranjem funkcije cilja, za svaki od promatranih slučajeva prema zadanim ulaznim podatcima iskorištena je maksimalna površina FPV stoga električna energija dobivena iz sustava FPV ovdje nije prikazana.

Pokazane karakteristike rada P2 i P3 su jednake. Do razlike dolazi u raspodjeli energije u sustavu, Graf 16 i Graf 17. Jednostavnim cjenovnim modelom dobivaju se teorijske vrijednosti rada sustava u ovisnosti o modelu. Do raspodjele u slučaju P1 dolazi isključivo zbog vremenski promjenjivih veleprodajnih cijena električne energije. U suprotnom bi model maksimizirao

proizvodnju kako bi iznos funkcije bio što veći što bi za posljedicu imalo veći broj radnih sati turbine pri maksimalnom kapacitetu. Složenijim modelom P2 i P3 dobiva se realnije ponašanje kod proizvodnje i potrošnje električne energije jer model ovisi puno više o cjenovnoj krivulji. Mala razlika između dobivenih rezultata za rad pumpe i za proizvedenu električnu energiju u RHE Velebit je zbog malih ušteda vode u usporedbi sa evaporacijom.



Graf 16. Proizvedena električne energije u RHE Velebit



Graf 17. Potrebna električne energije u RHE Velebit za rad pumpe

Primjetno je da kod najveće potrebne energije za rad pumpe, da je proizvodnja električne energije najmanja. Razlog tome je što je prirodni dotok⁹ u jezero Štikada u prva tri mjeseca nizak, što za posljedicu ima nisko prirodno punjenje spremnika te je potreban rad pumpe kako bi se zadovoljila ograničenja postavljena u zadatku. Usporedbom cijena vidljivo je da su veleprodajne cijene u prvoj polovici promatranog vremenskog perioda niske te je veća isplativost korištenja pumpe nego turbine. Veleprodajna cijena električne energije kao i dotok bilježe rast u drugoj polovici promatranog vremenskog perioda, a time raste proizvodnja električne energije u RHE Velebit.

5.4. Analiza stanja napunjenosti jezera Štikada

Stanje napunjenost (V_{lake}) definirano je ulaznim parametrima i ograničenjima. Donja granica stanja napunjenosti definirana je kao 25% ukupnog volumena jezera Štikada. Prilikom definiranja donje granice potrebno je paziti da granica ne bude jednaka ili približno jednak nuli jer bi takav uvjet doveo do ekološkog problema, npr. potpunog isušivanja akumulacijskog jezera. Gornja granica definirana je maksimalnim trenutnim volumenom jezera. Kada bi se gornja granica definirala veća od maksimalnog zapremnog volumena jezera postojala bi

⁹ Prirodni dotok – podatci dobiveni od mentora

opasnost od poplava. Također, smanjenjem dubine jezera dolazi do većih emisija štetnih plinova. Stanje napunjenosti prikazano je u Graf 18.

Prema podacima dobivenim modelom kreiran je polinom 6. stupnja kojim je moguće opisati stanje napunjenosti jezera za referenti model P1 i za P2. Pomoću polinoma moguće je unaprijed izračunati stanje napunjenosti što je bitno u pripremi proizvodnje električne energije. Prilikom planiranja proizvodnje dan unaprijed, preko polinoma moguće je pretpostaviti rad sustava na satnoj raspodjeli i time vidjeti kolika je rezerva zalihe vode koja može ući u proizvodnju. Krivulje podliježu promjeni ovisno o modelu sustava.

Krivulja napunjenosti jezera Štikada – P1:

$$y = -3E-15x^6 + 7E-11x^5 - 7E-07x^4 + 0.0028x^3 - 4.2598x^2 + 404.42x + 1E+07 \quad (30)$$

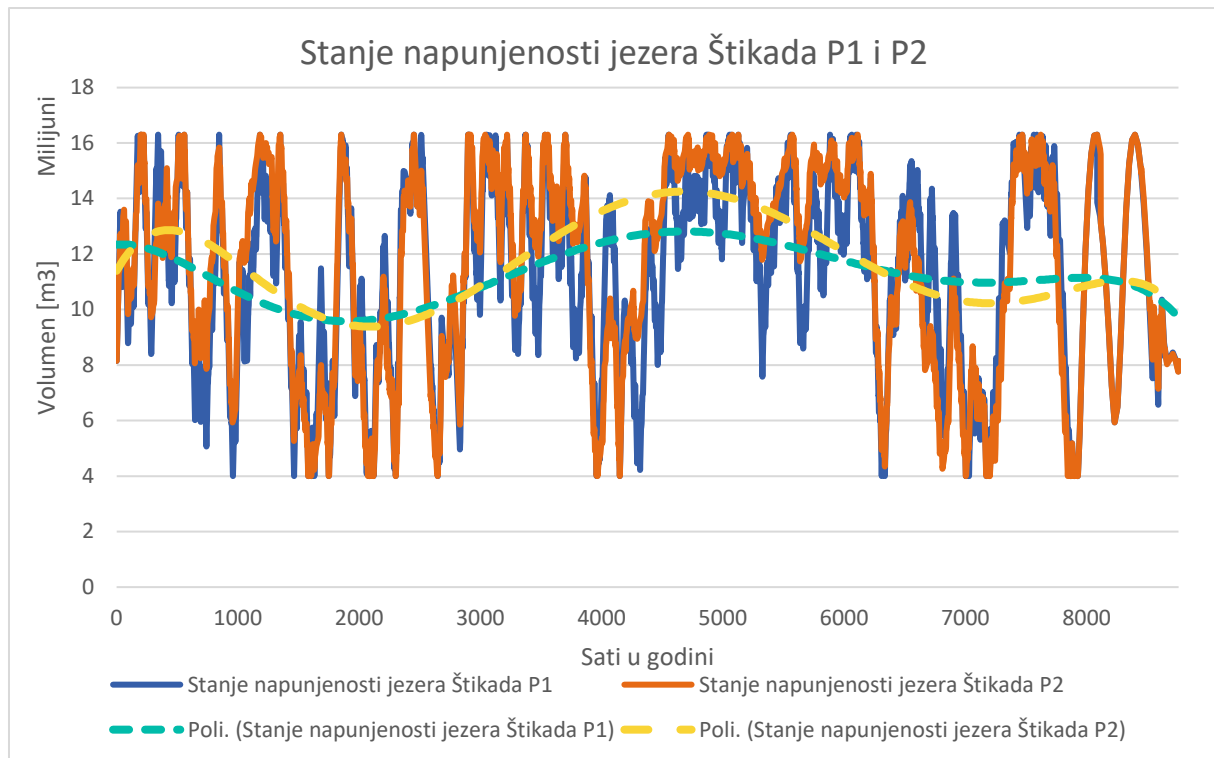
Gdje je:

y – stanje napunjenosti [m³],

x – promatrani sat u godini [h].

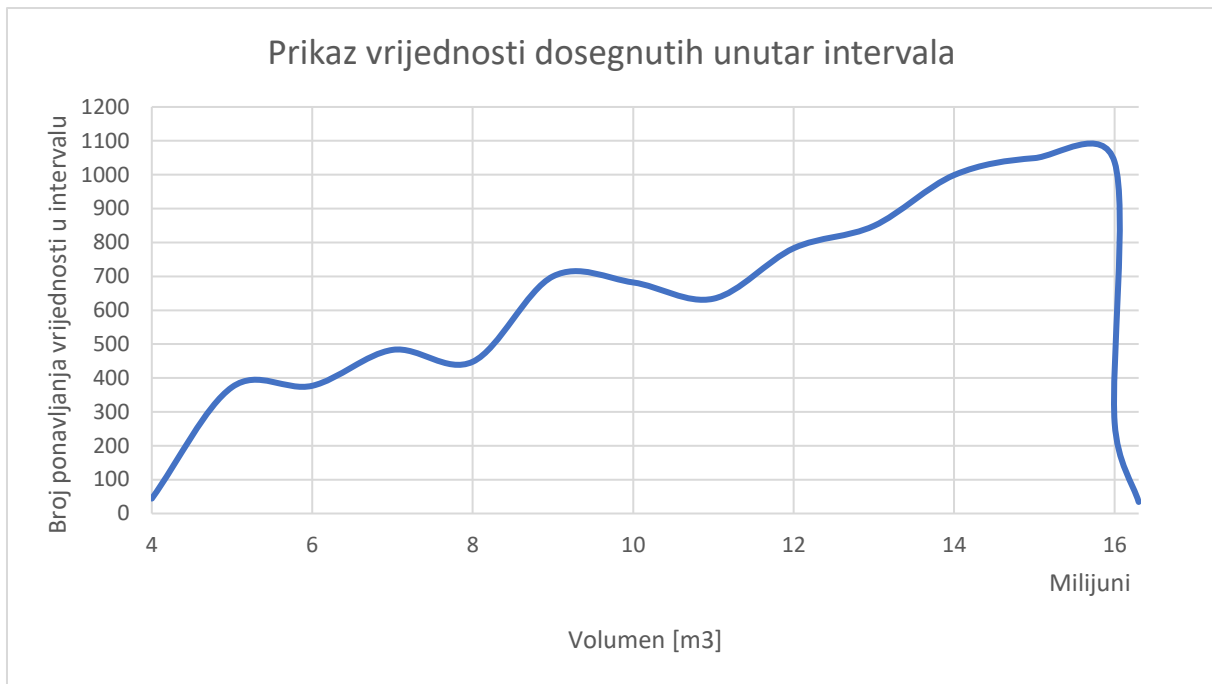
Krivulja napunjenosti jezera Štikada – P2:

$$y = -5E-15x^6 + 1E-10x^5 - 1E-06x^4 + 0.0066x^3 - 12.921x^2 + 7883x + 1E+07 \quad (31)$$



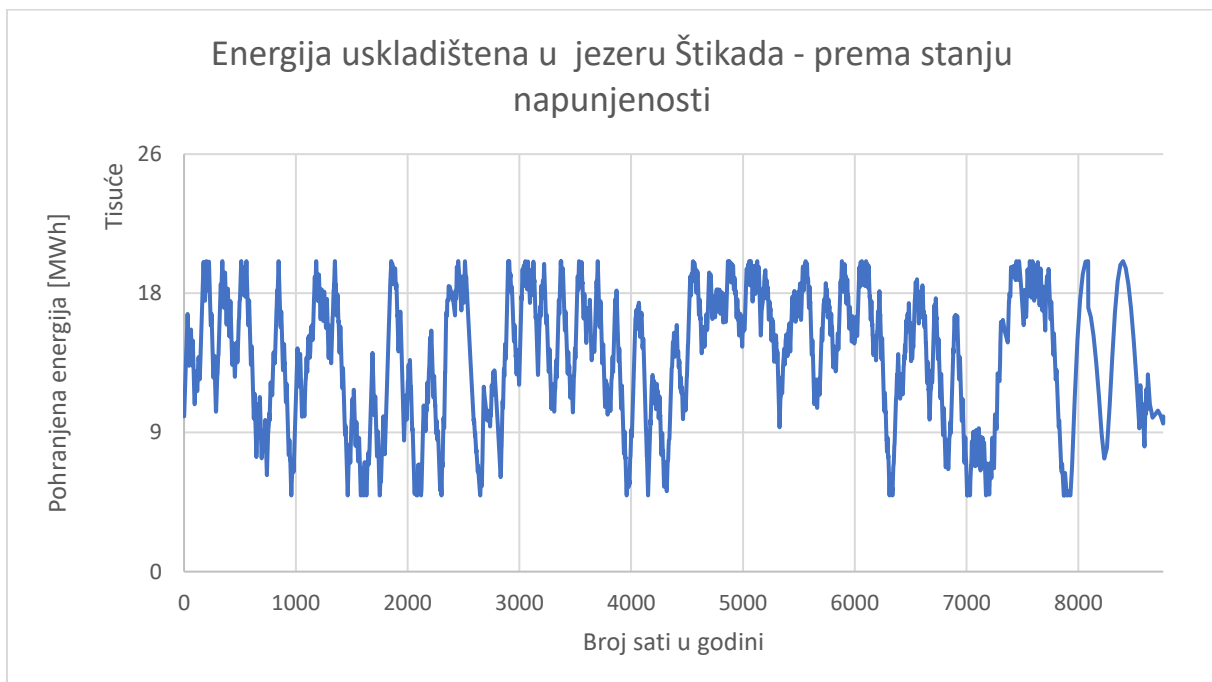
Graf 18. Stanje napunjenosti jezera Štikada

Ekološke katastrofe se mogu dogoditi ako se ne obraća pozornost na osnovne kriterije u kojima zbog rada HE dolazi do isušivanja jezera, potapanja okolice jezera ili isušivanja prirodnih vodnih tokova nizvodno od HE. Zbog toga je za referenti model napravljen grafički prikaz u kojemu je prikazano koliko puta model dosegne vrijednosti u određenom intervalu (P1), Graf 19. Može se uočiti da model najviše vremena radi u intervalu između 12 milijuna m³ i 16 milijuna m³. Ovim modelom rada jezero većinu vremena ima približno jednaki volumen njegovom maksimumu.



Graf 19. Prikaz vrijednosti dosegnutih unutar intervala

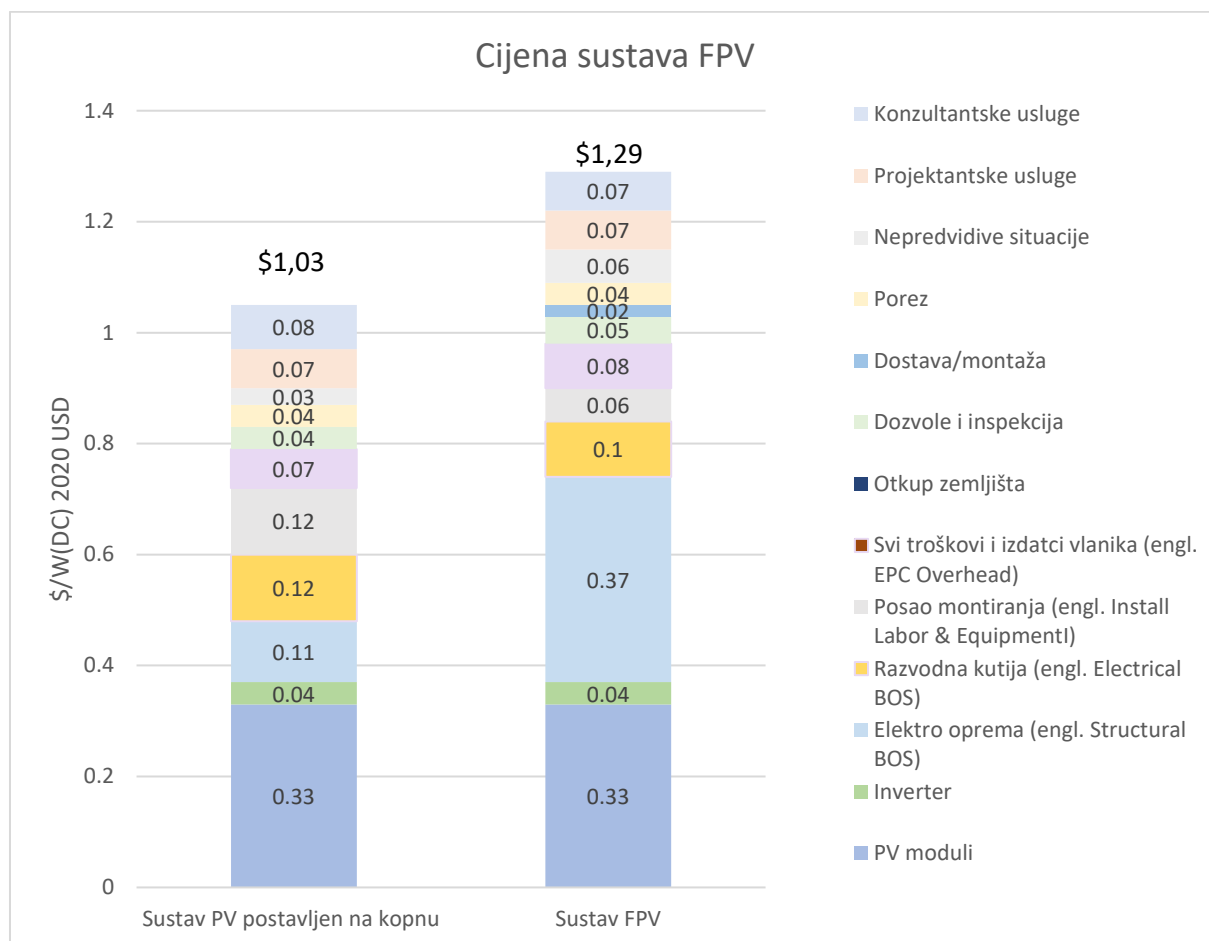
Jednostavnim računom ([50]) izračunat je energetski potencijal jezera Štikada iz podataka o stanju napunjenosti jezera. Graf 20, pokazuje potencijal jezera za ukupni volumen jezera odnosno kada bi se sav volumen jezera iskoristio za proizvodnju električne energije.



Graf 20. Energija uskladištena u jezeru Štikada - prema stanju napunjenosti

5.5. Analiza osjetljivosti promjene cijene sustava FPV

Novo tehnologije suočavaju se visokim početnim cijenama koje s vremenom opadaju kako tehnologija postaje više zastupljena u sustavima. Cijene sustava FPV bilježe pad u zadnjih par godina, a za potrebe ovoga zadatka uzeti su podaci prikazani Graf 21. Cijena izražena u Američkim dolarima preračunata je u Eure te iznosi 1,23 EUR/W.

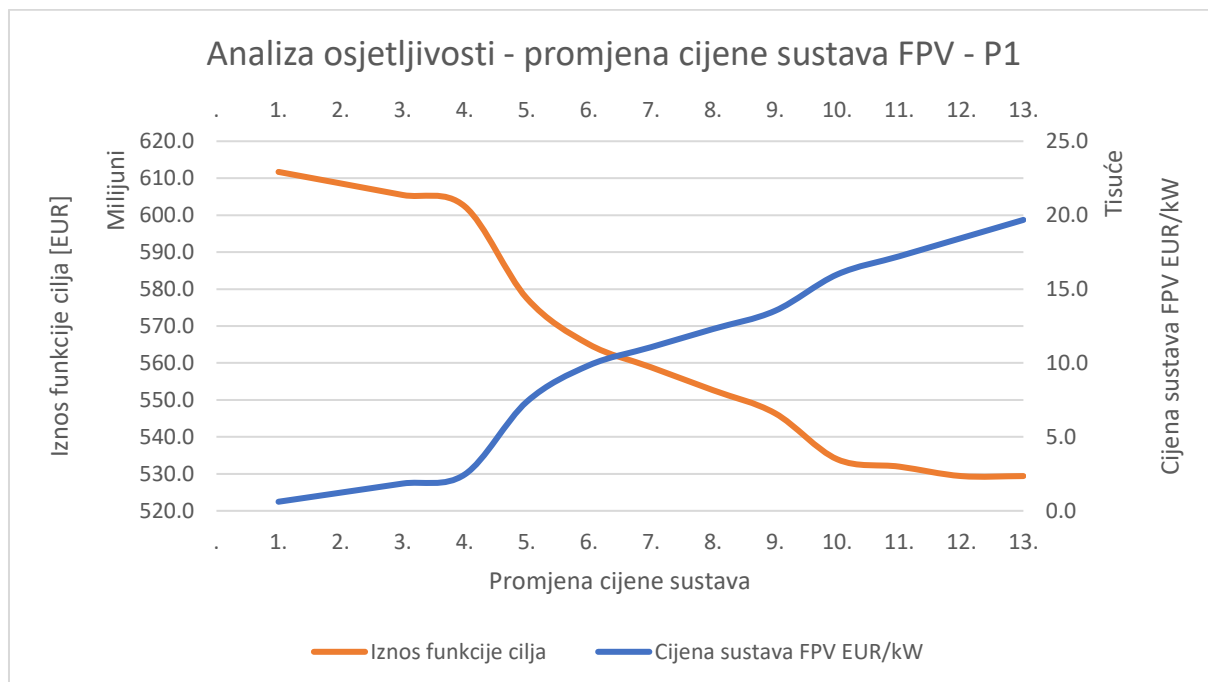


Graf 21. Cijena sustava FPV [48]

Zbog mogućnosti promjena cijene sustava FPV napravljena je analiza osjetljivosti gdje su cijene izražene u EUR/kW za P1 i P2, Graf 22 i za oba slučaja računat je iznos funkcije cilja. Jednom kada bi zbog neisplativosti ugradnje hibridnog sustava, model prikazao površinu jednaku 0 funkcije cilja su zabilježene i prikazane, ali pri tim rezultatima model ne uzima FPV u obzir odnosno investicija u sustav FPV je neisplativa.

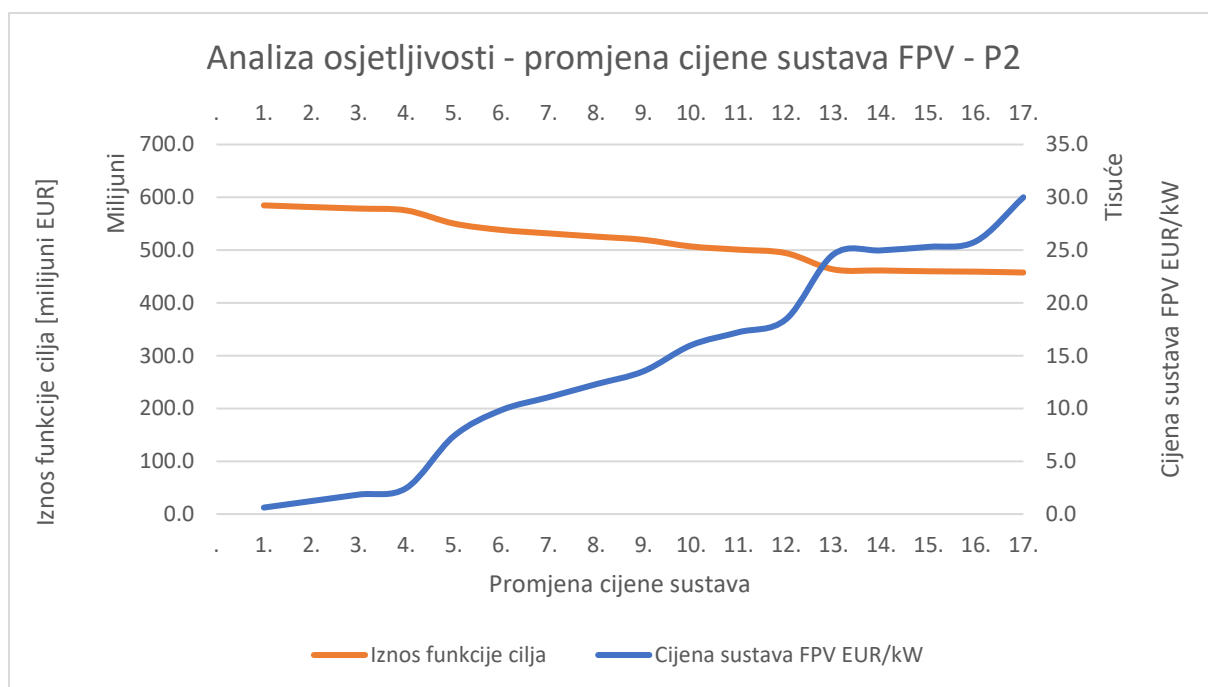
Prema Graf 22 vidljivo je da u slučaju P1 za svaku cijenu sustava koja je iznad 17 220 EUR/kW, što je 13 puta veća cijena nego početno uzeta, modelu se ne isplati postavljanje sustava FPV.

Što je vidljivo gotovo linearnim karakterom funkcije cilja nakon 11. promijene cijene sustava FPV. Funkcija cilja postigla bi vrijednosti jednake nuli kada bi sa radom prestala i RHE Velebit.



Graf 22. Analiza osjetljivosti - promjena cijene sustava FPV - P1

Razlika fleksibilnosti modela vidljiva je između P1 i P2 mogućnošću povećanja cijene sustava. Model investiciju za sustav FPV u P2 prikazuje neisplativom nakon povećanja cijene od 20 puta odnosno nakon 25 830 EUR/kW. Funkcija cilja poprima gotovo linearni karakter nakon 12. promijene cijene sustava FPV. Za slučaj P2 nakon 12 promjena cijene sustava FPV funkcija cilja se mijenja jako sporo odnosno između 12. i 13. promijene cijene sustava FPV promjena je 6%, a nakon promjena je 0,318%. Prema tome može se zaključiti da će RHE raditi sa manjim promjenama vrijednosti funkcije cilja ako u sustavu nije postavljen FPV što označava stabilnost sustava pri postavljenim cijenama. Analiza osjetljivosti prikazana je na Graf 23.



Graf 23. Analiza osjetljivosti - promjena cijene sustava FPV - P2

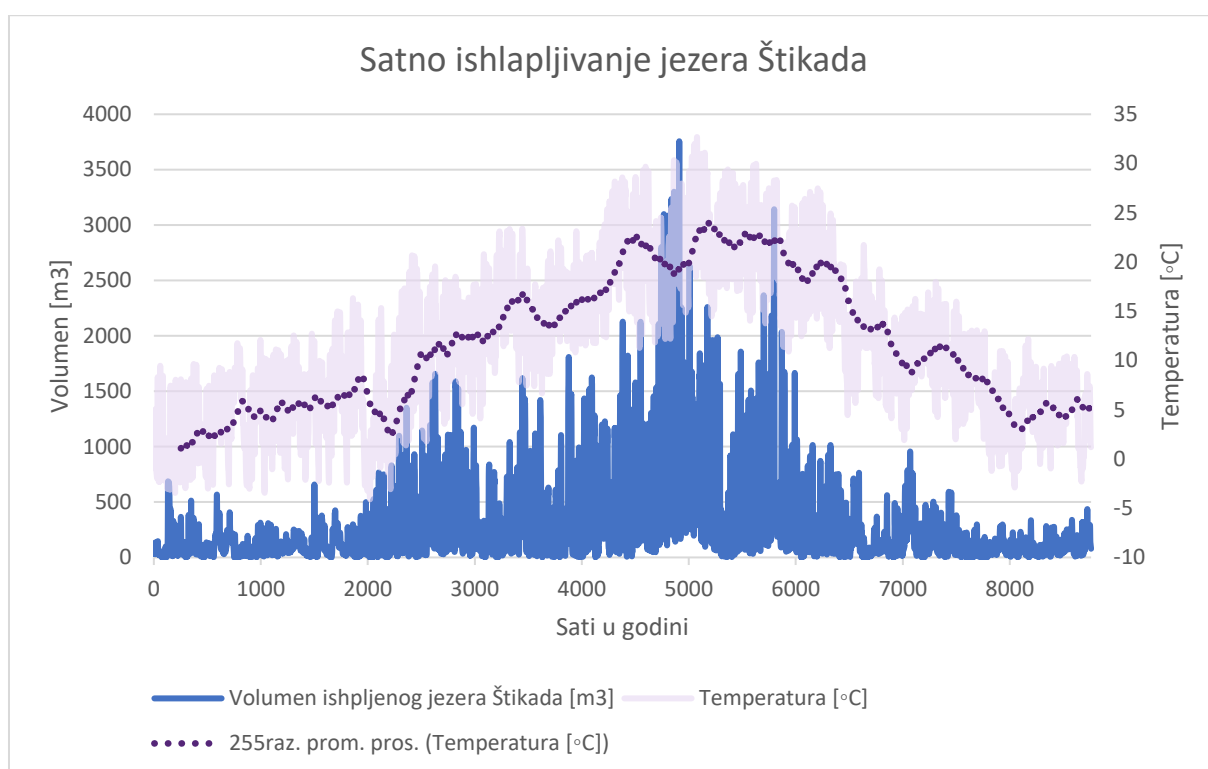
5.6. Analiza ishlapljivanja jezera Štikada

Ovaj rad ima dva osnovna cilja, proučiti rad RHE Velebit u hibridnom modelu sa sustavom FPV i u rezultatima prikazati uštede vode zbog pokrivenosti jezera sustavom FPV. Za potrebe ovoga zadatka napravljena je analiza kako promjena površine utječe na smanjenje ishlapljivanja jezera.

Graf 24 prikazuje satno ishlapljivanje jezera Štikada kada jezero nije pokriveno. Pri najvišim temperaturama dolazi do preklapanja krivulje temperature i krivulje volumena što je pokazatelj da povećanjem temperature se povećava i ishlapljeni volumen. Ukupan godišnji volumen koji ishlapi na jezeru Štikada iznosi 2,43 milijuna m³. Maksimalni volumen koji ishlapi u promatranom vremenskom periodu je 3755,73 m³/sat dok je prosječna vrijednost volumena koji ishlapi 278,33 m³/sat. Podatci prosječno dnevnog volumena koji ishlapi po mjesecima prikazan je u Tablica 19.

Tablica 19. Prosječni ishlapljeni volumen jezera Štikada

Mjesec	Volumen [m ³ /dan]	Mjesec	Volumen [m ³ /dan]
Siječanj	2579,18	Srpanj	19 110,91
Veljača	1957,82	Kolovoz	13 657,40
Ožujak	2958,91	Rujan	6679,72
Travanj	8067,37	Listopad	3718,43
Svibanj	7622,47	Studeni	2204,90
Lipanj	8977,68	Prosinac	2142,72

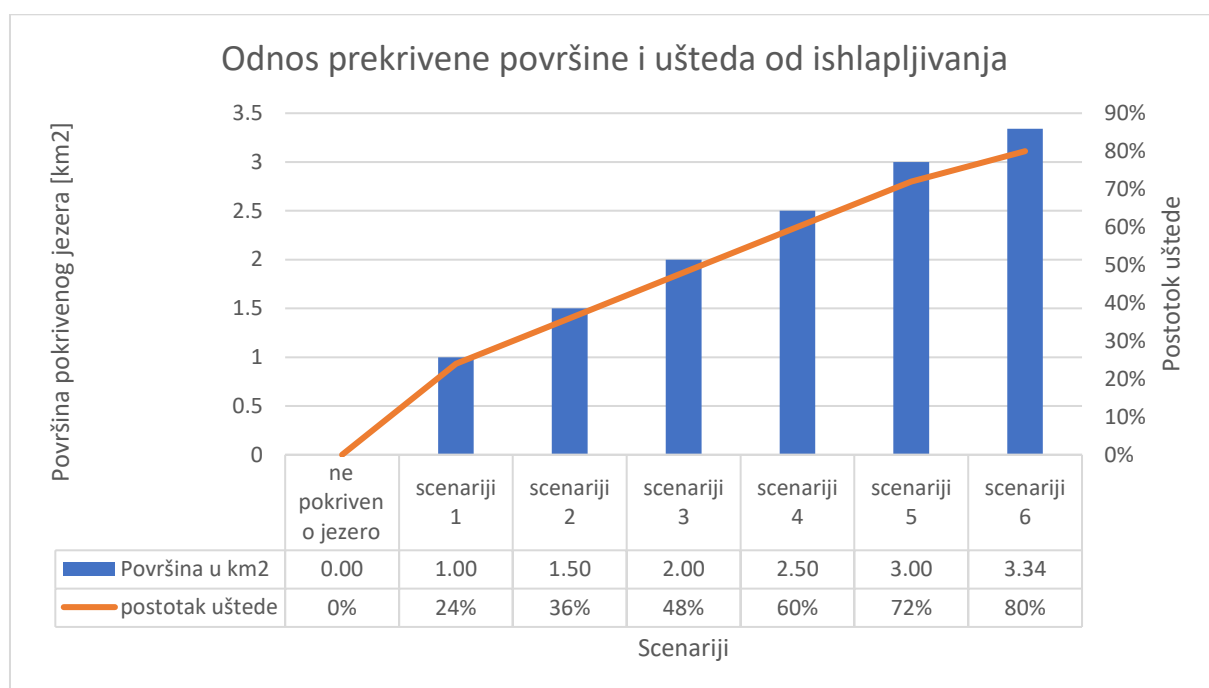


Graf 24. Satno ishlapljivanje jezera Štikada

Postavljena analiza ishlapljivanja u modelu pokazuje uštedu u volumenu ako je dio jezera pokriven sustavom FPV. Točnije pokrivanjem 30% površine jezera (1 km²), ušteda vode koja ne ishlapi iznosi 24%. Ukupna ušteda volumena vode je 584 000 m³.

Prema rezultatima prikazana je ovisnost povećanja površine i smanjenja ishlapljivanja. Usporedni scenariji pokazani su u Graf 25. Scenariji 6 u potpunosti je teorijski. Gledano sa konstrukcijske strane scenariji 6 je gotovo nemoguće izvesti jer je potrebno prilagoditi geometriju solarnih modula rubovima jezera. Također iako su jezera vode stajačice, zbog promjene volumena i gibanja površine jezera dolazilo bi do pucanja modula na samom rubu što

bi uzrokovalo dodatne troškove. U drugom slučaju, potpunim zatvaranjem površine jezera započelo bi odumiranje flore i faune u jezeru jer se ne bi mogla odvijati fotosinteza, a time bi koncentracija otopljenog kisika u jezeru naglo opadala. Prednosti prekrivanja vodene površine sustavom FPV doprinosi se očuvanosti vodenog resursa zbog smanjenog ishlapljivanja. Stoga je potrebno odrediti optimalnu površinu koja zadovoljava potrebe sustava i koja ne dovodi u opasnost floru i faunu jezera. Za jezero Štikada 30% pokrivenost pokazala se optimalnom u uštedi volumena i u investicijskom pogledu što je prikazano u prethodnim poglavljima. Povećanjem površine pokrivenosti jezera povećava se i ušteda volumena vode što za posljedicu ima smanjivanje potreba za rad pumpe čime se maksimizira funkcija cilja.



Graf 25. Odnos prekrivene površine i ušteda od ishlapljivanja

6. ZAKLJUČAK

Zadatak ovog rada bio je analizirati proizvodnju električne energije hibridnog sustava RHE i sustava FPV. Povećanim zahtjevima za energijom u EES, RHE omogućavaju aktivno skladištenje energije. Planiranjem i ulaganjem u inovacije kod već postojećih sustava omogućava se lakša integracija novih tehnologija, a time i OIE. Time se povećava fleksibilnost proizvodnje i osiguravaju potrebni zahtjevi EES. Energija proizvedena iz OIE ovisi o vremenskim uvjetima te za masovnu integraciju zahtjeva primjenu različitih rješenja kao što su spremnici energije, upravljanje potrošnjom i dr. Hibridizacijom sustava postiže se skladni rad dviju ili više tehnologija čime se omogućava efikasnije iskorištavanje energenata potrebnih za rad pojedine tehnologije.

Hidroenergija je OIE koji kao izvor ima karakteristike fleksibilnosti, mogućnosti skladištenja energije, karakteristiku kontrolirane proizvodnje i brzog odziva prema zahtjevima EES. Zbog velikog broja projekata u povijesti i danas tehnologije koje se koriste za proizvodnju energije iz vode su gotovo usavršene. Međutim, ako se prilikom planiranja u obzir ne uzmu efekti poput hidrološkog režima rijeka dolazi do promjena protoka te se time ugrožava ekosustav. Kao što je pokazano u ovome radu, prilikom planiranja proizvodnje iz RHE potrebno je postaviti ograničenja koja ne dovode ekosustav u stanje ugroženosti.

Povećanjem temperatura zraka, direktno uzrokovanim klimatskim promjenama dolazi do povećanog ishlapljivanja vodenih površina koje imaju izravan utjecaj na vodostaj akumulacijskih jezera. Postavljanjem FPV snage 64,62 MW smanjuje se ishlapljivanja vodene površine na mjestima gdje je sustav postavljen, povećava se efikasnost rada FPV, a time se omogućava i veći doprinos tehnologije u hibridnom sustavu. FPV predstavlja novu tehnologiju koja ima veliki potencijal za razvitak. Korištenjem FPV ne zauzima se korisna zemljana površina, a kao tehnologija nakon postavljanja zahtjeva minimalno održavanje sa očekivanim vijekom trajanja sustava između 20 i 25 godina.

Postavljeni model za ovaj rad temelji se na ulaznim podacima proizvodnje RHE Velebit i implementacije FPV na gornjem akumulacijskom jezeru, jezero Štikada. Analizom se pokazalo da je optimalan kut za postavljanje FPV iznosi 35°, a površina koju sustav FPV pokriva je 1 km² što čini 30% ukupne površine jezera. Prilikom analize funkcije cilja primijećeno je da ona izravno ovisi o cijenama električne energije te da dolazi do značajnih promjena kod definiranja različitih cjenovnih režima. Model P1 postavljen je za referenti model zbog dostupnih ulaznih podataka. Rad hibridnog sustava direktno ovisi o cijenama električne energije. Analizom je

pokazano da u mjesecima u kojima je povećana proizvodnja električne energije dolazi do smanjivanja korištenja energije potrebne za rad pumpe, što je direktno povezano sa napunjenosti jezera. Analizom napunjenosti jezera pokazano je da hibridni sustav koristi gornje jezero kao skladište energije, a da se time ne dovodi u opasnost ekosustav jezera. Razlog tome je što model većinu vremena radi u intervalu između 12 milijuna m³ i 16 milijuna m³ što su gornje vrijednosti napunjenosti jezera. Iako je FPV nova tehnologija i time podliježe znatnim investicijskim promjenama pokazano je da do značajnih promjena u P1 dolazi nakon povećanja cijene sustava za 13 puta a kod P2 za 20 puta. Posljednja analiza napravljena je pregledom utjecaja površine sustava FPV i volumena koji ishlapi. Pokazano je da postavljanjem sustava na površini od 1 km² dolazi do uštede od 24% odnosno od 584 000 m³ vode. Analizom dobivenih rezultata pokazano da je hibridni sustav održiv i isplativ na lokaciji RHE Velebit. Kako bi model bio pogodan za složenije analize potrebno ga je doraditi. Prva mogućnost točnijeg izračuna je proračun sa relevantnim cijenama u vremenskom trenutku proračuna. Za potrebe ovakvog modela za buduće korištenje potrebno je definirati realne zahtjeve EES. Time bi se ovisnost o cijenama ublažila i veća pažnja dala potreba EES. Velika mana ovog modela je što pri postavljanju ulaznih podataka nije bilo moguće stvarno praćenje dotoka i odtoka u jezeru Štikada jer na lokaciji ne postoji mjerna stanica. Praćenje dotoka i odtoka je treća mogućnost točnijeg proračuna ovog modela. Prilikom realizacije projekta hibridnog sustava na RHE Velebit za sustav FPV potrebno je odrediti točnu lokaciju postavljanja. Također prilikom projektiranja, obavezno je napraviti studiju o okolišu kako se ne bi narušio biljni i životinjski svijet jezera Štikada.

LITERATURA

- [1] “HEP.” <https://www.hep.hr/proizvodnja/hidroelektrane-1528/pp-he-jug/rhe-velebit/1546> (accessed Jun. 10, 2022).
- [2] “Solvis fotonaponski moduli.” [Online]. Available: https://solvis.hr/wp-content/uploads/2022/03/LQSOLVIS-DS-HR-SV144_E_HC9B-2094x1038x35-435-455-20210222.pdf.
- [3] Hrvatska elektroprivreda, *Hidroelektrane u Hrvatskoj*. Zagreb: Hrvatska elektroprivreda d.d, 2020.
- [4] C. Cheng, C. Su, P. Wang, J. Shen, J. Lu, and X. Wu, “An MILP-based model for short-term peak shaving operation of pumped-storage hydropower plants serving multiple power grids,” *Energy*, vol. 163, pp. 722–733, 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.08.077.
- [5] “Thermal Energy Storage @ celsiuscity.eu.” <https://celsiuscity.eu/thermal-energy-storage/> (accessed Jun. 13, 2022).
- [6] “Mechanical-Energy-Storage-Research @ Wwww.Swri.Org.” <https://www.swri.org/industry/advanced-power-systems/mechanical-energy-storage-research#:~:text=Mechanical energy storage works in,to electro-chemical battery storage.> (accessed Jun. 13, 2022).
- [7] “pumped-storage @ www.hydropower.org.” <https://www.hydropower.org/factsheets/pumped-storage> (accessed Jun. 13, 2022).
- [8] I. R. E. Agency, “Insights on Renewables - International Renewable Energy Agency.” <http://www.irena.org/home/index.aspx?PriMenuID=12&mnu=Pri>.
- [9] “History-hydropower @ www.energy.gov.” <https://www.energy.gov/eere/water/history-hydropower> (accessed May 02, 2022).
- [10] P. Bojek and H. Bahar, “IEA (2021), Hydropower,” *IEA, Paris*. <https://www.iea.org/reports/hydropower>.
- [11] IEA, “Hydropower Special Market Report - Analysis and forecast to 2030,” p. 126, 2021, [Online]. Available: https://iea.blob.core.windows.net/assets/4d2d4365-08c6-4171-9ea2-8549fabd1c8d/HydropowerSpecialMarketReport_corr.pdf.

- [12] O. Comstock, "U.S. Energy Information Administration, Annual Electric Generator Inventory," 2020. <http://www.eia.gov/todayinenergy/detail.cfm?id=25372>.
- [13] G. INP-Ense3, É. N. Supérieure, and l'Eau et l'Environnement de l'Énergie, "Encyclopédie de l'énergie." <https://www.encyclopedie-energie.org/en/hydroelectricity-environmental-societal-impacts/> (accessed Jun. 01, 2022).
- [14] U.S. Army photo by Karim Delgado, "Fish ladders on the Columbia River." <https://api.army.mil/e2/c/images/2021/07/19/17531645/original.jpg> (accessed Jun. 01, 2022).
- [15] "Top 6 biggest hydroelectric power plants in the world." <https://constructionreviewonline.com/biggest-projects/top-6-biggest-hydroelectric-power-plants-in-the-world/> (accessed May 18, 2022).
- [16] "Hidroelektrana_Tri_klanca @ hr.wikipedia.org." https://hr.wikipedia.org/wiki/Hidroelektrana_Tri_klanca#cite_note-16 (accessed Jun. 18, 2022).
- [17] "Three_Gorges_Dam @ en.wikipedia.org." https://en.wikipedia.org/wiki/Three_Gorges_Dam (accessed May 18, 2022).
- [18] W. Zhang, "Weighing the Pros and Cons: Transformation of Angle of View for Three Gorges Dam," *Nat. Resour.*, vol. 05, no. 16, pp. 1048–1056, 2014, doi: 10.4236/nr.2014.516088.
- [19] "Itaipu_Dam @ en.wikipedia.org." https://en.wikipedia.org/wiki/Itaipu_Dam (accessed May 18, 2022).
- [20] "Xiluodu_Dam @ en.wikipedia.org." https://en.wikipedia.org/wiki/Xiluodu_Dam (accessed May 18, 2022).
- [21] "Hidroelektrana_Guri @ hr.wikipedia.org." https://hr.wikipedia.org/wiki/Hidroelektrana_Guri (accessed May 18, 2022).
- [22] "Belo_Monte_Dam @ en.wikipedia.org." https://en.wikipedia.org/wiki/Belo_Monte_Dam (accessed May 18, 2022).
- [23] "Hidroelektrana_Tucuruí @ hr.wikipedia.org."

- https://hr.wikipedia.org/wiki/Hidroelektrana_Tucuruí (accessed May 18, 2022).
- [24] “Grand_Coulee_Dam @ en.wikipedia.org.”
https://en.wikipedia.org/wiki/Grand_Coulee_Dam.
- [25] “Elektro mreža u Hrvatskoj.”
<https://sites.google.com/site/elektromrezauhrvatskoj/home/hidroelektrana> (accessed Jun. 08, 2022).
- [26] N. Holjevac, “Prvi cjeloviti višefazni elektroenergetski sustav na svijetu – Krka Šibenik,” 2013, [Online]. Available: <https://hrcak.srce.hr/file/346624>.
- [27] H. Proizvodnja, “HE Varaždin.” <https://www.hep.hr/proizvodnja/hidroelektrane-1528/pp-he-sjever/he-varazdin/1532> (accessed Jun. 20, 2022).
- [28] H. Proizvodnja, “HE Čakovec.” <https://www.hep.hr/proizvodnja/hidroelektrane-1528/pp-he-sjever/he-cakovec/1533> (accessed Jun. 20, 2022).
- [29] H. Proizvodnja, “HE Dubrava.” <https://www.hep.hr/proizvodnja/hidroelektrane-1528/pp-he-sjever/he-dubrava/1534> (accessed Jun. 20, 2022).
- [30] ENERKON, “mHE Ilovac.” <https://www.enerkon.hr/1971/>.
- [31] B. Vuk *et al.*, “Energija u Hrvatskoj 2020,” p. 244, 2021, [Online]. Available: https://www.eihp.hr/wp-content/uploads/2022/01/Velika_EIHP_Energija_2020.pdf.
- [32] Wikipedia, “Hidroelektrana_Velebit @ hr.wikipedia.org.”
https://hr.wikipedia.org/wiki/Hidroelektrana_Velebit.
- [33] G. Krajačić, “Analysis of financial mechanisms in support to new pumped hydropower storage projects in Croatia,” *Appl. Energy*, vol. 101, pp. 161–171, 2013, doi: 10.1016/j.apenergy.2012.07.007.
- [34] K. Kiviranta, “Vision for 100% renewable Åland Islands,” 2019.
- [35] C. S. Galán, “Wind-pumped-hydro Power Station of El Hierro,” 2020.
<https://fedarene.org/best-practice/wind-pumped-hydro-power-station-of-el-hierro/>
(accessed May 24, 2022).
- [36] M. Simao and H. Ramos, “Hybrid Pumped Hydro Storage Energy Solutions towards Wind and PV Integration: Improvement on Flexibility, Reliability and Energy Costs,” *Water*, vol. 12, p. 2457, Sep. 2020, doi: 10.3390/w12092457.

- [37] 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,” *Sustain.*, vol. 13, no. 8, pp. 1–17, 2021, doi: 10.3390/su13084317.
- [38] E. S. M. A. Program and S. E. R. I. of Singapore, “Where Sun Meets Water,” 2019. doi: 10.1596/32804.
- [39] European Commission, “PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM.” https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/#MR.
- [40] C. B.-N.-N. 3. . Asian Development Bank, “The floating solar photovoltaic power generation panels at the Da Mi hydro power plant in Binh Thuan, Viet Nam.” https://live.staticflickr.com/65535/49016433041_23e637bb5c_b_d.jpg (accessed Jun. 28, 2022).
- [41] “INNOVATIVE COVER with PV FOIL for the CYPRUS WATER DEVELOPMENT DEPARTMENT.” <http://aerotrlicity.net/news-updates/>.
- [42] “technologies @ www.floating-solar.com.” <http://www.floating-solar.com/technologies.html>.
- [43] R. Cazzaniga, M. Rosa-Clot, P. Rosa-Clot, and G. M. Tina, “Integration of PV floating with hydroelectric power plants,” *Heliyon*, vol. 5, no. 6, 2019, doi: 10.1016/j.heliyon.2019.e01918.
- [44] S. E. I. of S. World Bank Group, ESMAP, “Where Sun Meets Water,” *Where Sun Meets Water*, 2019, doi: 10.1596/32804.
- [45] H. F. Abd-Elhamid, A. Ahmed, M. Zeleňáková, Z. Vranayová, and I. Fathy, “Reservoir Management by Reducing Evaporation Using,” *Water*, vol. 13, no. 6, pp. 1–20, 2021, [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/w13060769>.
- [46] G. E. Harbeck, “A practical Field Technique For Measuring Reservoir Evaporation utilizing Mass-Transfer Theory,” *US Geol. Surv. Prof. Pap.*, vol. 272-E, pp. 101–105, 1962, [Online]. Available: <http://pubs.usgs.gov/pp/0272e/report.pdf>.
- [47] PVGIS, “Photovoltaic Geographical Information System,” *EU Science Hub - European Commission*, 2012. https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/.
- [48] V. Ramasamy and R. Margolis, “Floating Photovoltaic System Cost Benchmark : Q1

- 2021 Installations on Artificial Water Bodies,” *Nrel*, no. October, 2021, [Online]. Available: www.nrel.gov/publications.
- [49] CROPEX, “CROPEX Annual Report 2021,” 2021. [Online]. Available: https://www.cropex.hr/images/CROPEX_Annual_report_2021.pdf.
- [50] “pumped_hydro @ www.homerenergy.com.” https://www.homerenergy.com/products/pro/docs/3.11/pumped_hydro.html (accessed Jun. 29, 2022).
- [51] D. Boban, “Investicije u Hrvatskoj,” Sveučilište Jurja Dobrile u Puli (Fakultet ekonomije i turizma “Dr. Mijo Mirković”) Pula, 2017.