

Mogućnost izgradnje reverzibilne hidroelektrane na Perućkom jezeru

Čavar, Marko

Undergraduate thesis / Završni rad

2015

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:235:226661>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-15**

Repository / Repozitorij:

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





Sveučilište u Zagrebu

Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Marko Čavar
003518830

Zagreb, 2015.



Sveučilište u Zagrebu

Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada:

Doc. dr. sc. Goran Krajačić

Student:

Marko Čavar

0035188309

Zagreb, 2015.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Data: 26-02-2015	Prilog
Klasa: 602-04/15-6/3	
Ur.broj: 15-1703-15-106	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Marko Čavar**

Mat. br.: **0035188309**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Mogućnost izgradnje reverzibilne hidroelektrane na Perućkom jezeru**

Naslov rada na engleskom jeziku: **A possibility for construction of reversible hydro power plant at the Peruca lake**

Opis zadatka:

Reverzibilne i crpno-akumulacijske hidroelektrane trenutno predstavljaju najveća postrojenja za skladištenje električne energije. Ukupna instalirana snaga postrojenja u svijetu je 128 GW od čega je oko 32% instalirano u zemljama EU. Zbog dobrih radnih karakteristika, reverzibilne hidroelektrane se nameću kao jedno od rješenja za sve veću integraciju energije iz varijabilnih, obnovljivih izvora u elektroenergetske sustave. Svrha rada je analizirati mogućnost gradnje reverzibilne hidroelektrane na Perućkom jezeru.

U radu je potrebno:

1. Napraviti pregled literature i opisati najmodernija reverzibilna i crpno-akumulacijska postrojenja s glavnim tehno-ekonomskim karakteristikama.
2. Prema kriterijima iz literature odabrati lokaciju gornjeg akumulacijskog jezera te odrediti ukupne raspoložive kapacitete akumulacija. Opisati dobre i loše strane odabrane lokacije.
3. Izraditi jednostavan matematički model reverzibilne hidroelektrane priključene na elektroenergetski sustav Republike Hrvatske (RH). Model treba napraviti na osnovu satne energetske bilance postrojenja. Elektroenergetski sustav tretirati kao zatvoren sustav.
4. Koristeći model iz točke 3., proračunati mogućnost skladištenja električne energije proizveden iz vjetroelektrana ukupne instalirane snage 1200 MW, 2400 MW i 3600 MW. Pretpostaviti da reverzibilna hidroelektrana skladišti energiju samo kada je prosječna satna proizvodnja iz vjetroelektrana veća od 600 MWh. Pražnjenje gornje akumulacije osigurati u vršnim satima prema krivulji satnog opterećenja elektroenergetskog sustava RH.
5. Odrediti proizvodnu cijenu električne energije iz reverzibilne hidroelektrane uzimajući u obzir podatke iz literature, zajamčenu otkupnu cijenu električne energije iz vjetroelektrana, prosječnu godišnju kamatnu stopu EIBa za 2013. god. i radne sate postrojenja dobivene u 4.

Potrebni podaci i literatura se mogu dobiti kod mentora. U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

25. studenog 2014.

Zadatak zadao:

Doc. dr. sc. Goran Krajačić

Rok predaje rada:

1. rok: 26. veljače 2015.

2. rok: 17. rujna 2015.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 2., 3., i 4. ožujka 2015.

2. rok: 21., 22., i 23. rujna 2015.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

Izjavljujem da sam ovaj rad radio samostalno, služeći se znanjem stečenim tijekom studija i koristeći navedenu literaturu.

Ovom prilikom zahvaljujem:

Voditelju rada Doc. dr. sc. Goranu Krajačiću na savjetima i pomoći tijekom izrade završnog rada.

Također zahvaljujem i obitelji na razumijevanju, potpori i pomoći kako tijekom izrade ovog rada, tako i tijekom cijelog studija te svojim kolegama i prijateljima na potpori i pomoći tijekom studiranja.

SAŽETAK

Opskrba i potražnja za električnom energijom moraju biti uravnoteženi kako bi se postigao optimalan rad sustava. Jedan od glavnih izvora uravnoteženja u električnim mrežama u većini razvijenih zemalja su spremnici električne energije, a primjer takvog velikog uravnoteženja je i korištenje reverzibilnih hidroelektrana. Sukladno odlukama o smanjenju korištenja fosilnih goriva, tj. o dekarbonizaciji sistema električne energije, nameće se povećano iskorištavanje OIE poput vjetra i sunčeve energije. No, oni su ovisni o prirodnim uvjetima i nisu uvijek raspoloživi, što može dovesti do problema pomanjkanja kada je potreba za energijom najveća. Stoga je povećan utjecaj tj doprinos električne energije dobivene iz OIE u električnu mrežu moguć uz izgradnju reverzibilnih hidroelektrana. Tako se u velikoj mjeri smanjuje ovisnost električne mreže o prirodi navedenih OIE jer se uspijeva pohraniti energiju npr. vjetra kada je ona najveća, a potražnja, u obliku pohrane vode u gornji akumulacijski spremnik. Za rad pumpe za pohranu vode koristi se također energija vjetra što znači da se ne troši nikakva dodatna energija iz mreže za pohranu vode. Kada se situacija promijeni, tj kada je dostupnost vjetra mala, a zahtjev za električnom energijom veliki, jednostavnom promjenom režima rada iz pumpe u turbinu dobiva se iskorištavanje prethodno pohranjene vode u gornjoj akumulaciji, proizvodnju električne energije te ispunjavanje traženih zahtjeva za energijom. Na taj način se "zatvorila" povratnu vezu i donekle se uspjelo u namjeri da se proizvoljno kontroliraju zahtjevi električne mreže s korištenjem energije vjetra, odnosno promjenjivih OIE. Izgradnja reverzibilnih hidroelektrana se otežava činjenicom da se moraju ispuniti određeni kriteriji za izgradnju tj odabir lokacije, da je sve teže pronaći povoljan položaj za izgradnju, da su investicijski troškovi jako veliki i da postoje određeni društveni problemi, odnosno prepreke. Stoga se transformacija postojećih hidroelektrana ili prirodnih rezervoara vode u reverzibilne hidroelektrane nameće kao prikladno rješenje. Transformacije ovog tipa imaju manji investicijski trošak nego izgradnja novih reverzibilnih hidroelektrana, a imaju i manji utjecaj na okoliš. Koncept reverzibilnih hidroelektrana omogućio bi integraciju dobivanja električne energije iz OIE. Gubici energije odnose se na iskoristivost pumpe pri skladištenju volumena vode u akumulaciju i efikasnost proizvodnje električne energije u postrojenju. Ovisno o vrsti postrojenja, duljini cjevovoda i drugim karakteristikama, gubici iznose 20-25%. Uz to, prednost ovakvog sustava predstavlja i moguću zamjenu elektrana na fosilna goriva u skupom pokrivanju vršnih zahtjeva za električnom energijom. Pridonosi se i kontroli, tj. zaštiti od poplava i pripomaže se navodnjavanju tla ako se gornja akumulacija izvede tako da postoji mogućnost odvođenja vode. Korištenjem metodologije za transformaciju postojećih hidroelektrana, postoji mogućnost za pronalazak idealne lokacije koja bi poslužila za izgradnju gornje akumulacije blizu jezera Peruće s čime bi se ostvarili uvjeti za transformaciju hidroelektrane na navedenom jezeru u reverzibilnu

hidroelektranu i tako se omogući povećana penetracija OIE u elektroenergetsku mrežu RH. Odabirom lokacije i proračunavanjem mogućnosti uravnoteženja elektroenergetske mreže, dobiva se pregled mogućnosti pumpanja i vraćanja vode pomoću novoizgrađene akumulacije. Izračunom proizvodne cijene ovako dobivene električne energije, uz investicijske troškove i poznatu kamatnu stopu, može se izračunati isplativost projekta i procijeniti isplati li se izgraditi ovakvo postrojenje.

KLJUČNE RIJEČI

Reverzibilna hidroelektrana, kriteriji odabira lokacije gornje hidroelektrane, satna bilanca matematičkog modela, godišnja pohranjena voda, godišnja proizvedena električna energija, odbačena energija vjetra, mogućnost prihvata vode, cijena proizvodne električne energije

SADRŽAJ

SAŽETAK.....	5
KLJUČNE RIJEČI.....	6
SADRŽAJ	7
POPIS OZNAKA	9
POPIS SLIKA	12
POPIS TABLICA.....	13
1. UVOD.....	14
2. REVERZIBILNE HIDROELEKTRANE	15
2.1. Opis i način rada.....	15
2.2. Najmodernija i najveća postrojenja u svijetu[4]	18
2.2.1. Bath Country[5]	18
2.2.2. Guangdong(Guangzhou)[6]	18
2.2.3. Huizhou[7]	18
2.2.4. Okutataragi[8].....	19
2.2.5. Ludington[9]	19
2.2.6. Fengning[10].....	19
2.2.7. Kannagawa[11].....	19
2.2.8. Dniester(Dnjestar)[12]	20
3. ODABIR LOKACIJE GORNJEG AKUMULACIJSKOG JEZERA [14].....	21
3.1. Definicija metodologije i kriteriji odabira lokacije	21
3.2. Odabir lokacije	25
3.3. Ukupni raspoloživi kapacitet akumulacije.....	28
3.4. Prednosti lokacije	29
3.5. Nedostatci lokacije.....	29

4. JEDNOSTAVAN MATEMATIČKI MODEL REVERZIBILNE HIDROELEKTRANE	31
4.1. Odluka o pumpanju vode i određivanje ekvivalente vrijednosti energije pumpanja P_i	35
4.2. Određivanje ekvivalente vrijednosti energije oduzimanja T_i	36
4.3. Određivanje volumena vode u spremniku	36
5. MOGUĆNOST SKLADIŠTENJA ELEKTRIČNE ENERGIJE IZ VJETROELEKTRANA	38
5.1. Pretpostavke i način skladištenja energije	38
5.2. Instalirana snaga vjetroelektrana: 1200 MW	44
5.3. Instalirana snaga vjetroelektrana: 2400 MW	45
5.4. Instalirana snaga vjetroelektrana: 3600 MW	46
6. PROIZVODNA CIJENA ELEKTRIČNE ENERGIJE IZ RHE [29] [30] [31]	48
7. ZAKLJUČAK	51
8. LITERATURA	53

POPIS OZNAKA

Oznaka	Opis	Mjerna jedinica
Θ	kut nagiba terena	°
E	teoretska pohranjena energija u gornjem spremniku	Wh
ρ	gustoća vode	kg/m ³
g	gravitacijska konstanta	m/s ²
$H_{\text{Peruća}}$	nadmorska visina jezera Peruća	m
$H_{\text{akumulacija}}$	nadmorska visina gornje akumulacije	m
H	razlika u nadmorskoj visini	m
d	promjer spremnika gornje akumulacije	m
h	visina spremnika	m
A	površina vode u akumulaciji	m ²
V	volumen vode u akumulaciji	m ³
L	duljina cjevovoda	m
H_p	karakteristika pumpe	m
Q	protok vode	m ³ /h
H_T	karakteristika turbine	m
ξ	gubici u cjevovodu	-
λ	koeficijent trenja	-
Re	Reynoldsov broj	-
v	brzina strujanja	m/s
D_p	promjer cjevovoda	m
ν	kinematska viskoznost	m ² /s
Q_{max}	maksimalni protok vode	m ³ /h

ε_S	relativna hrapavost	-
ε	apsolutna hrapavost	m
k	lokalni gubici u cjevovodu	-
v_{\max}	maksimalna brzina strujanja vode	m/s
P	razlika energije iz vjetroelektrana i opterećenja EES	Wh/h
P_{vjetar}	proizvedena energija iz vjetroelektrana	Wh/h
P_{opt}	opterećenje EES	Wh/h
$V_{G,A,i}$	volumen vode u spremniku u trenutku i	m^3
$V_{G,A,i-1}$	volumen vode u spremniku u prethodnom trenutku	m^3
V_p	volumen vode koji se pohranjuje u gornju akumulaciju	m^3
V_t	volumen vode koji se oduzima iz gornje akumulacije	m^3
P_i	utrošena energija vode za pumpanje u satu	Wh/h
T_i	proizvedena električna energija u satu	Wh/h
GNV	godišnje napumpana voda	m^3
GPE	godišnje proizvedena energija	Wh
OEV	odbačena energija vjetra	Wh
η	iskoristivost pumpe/turbine	-
N_P	broj pumpi	-
N_T	broj turbina	-
C_{RT}	cijena reverzibilne turbine	€
$P_{P,naz}$	nazivna snaga pumpe	W
$P_{T,naz}$	nazivna snaga turbine	W
C_M	cijena materijala cjevovoda	€/m

C_{IZOL}	cijena izolacije za cjevovod	€/m
C_{ISKOP}	cijena iskopavanja za postavljanje cjevovoda	€/m
C_{TEREN}	cijena izravnavanja terena za postavljanje spremnika	€
C_{GC}	cijena priključenja na električnu mrežu	€
C_{CS}	cijena sistema kontrole	€
C_{TR}	cijena transporta opreme	€
C_{PE}	troškovi plaća radnika	€
C_O	cijena ostalih troškova	€
TIC_{WPS}	ukupni investicijski troškovi	€
OMC_{WPS}	troškovi pogona i održavanja	€
EPC_T	proizvodna cijena električne energije	kn/kWh
R	anuitet	-
N	broj godina otplaćivanja	god
i	kamatna stopa EIB-a	%
p_w	zajamčena otkupna cijena električne energije iz vjetroelektrana	kn/kWh
CE_c	troškovi energije iz konvencionalnih izvora za pumpanje vode	€
BE_w	trošak izravne apsorpcije vjetra za pogon motora pumpe	Wh
$E_{W,h \rightarrow A}$	količina izravno apsorbirane energije u mrežu iz vjetroelektrana	Wh
E_T	godišnje proizvedena električna energija	Wh

POPIS SLIKA

Slika 1. Shema reverzibilne hidroelektrane [2].....	15
Slika 2. Otvorena izvedba gornje akumulacije[3].....	16
Slika 3. RHE Ludington [13]	20
Slika 4. Udaljenost od naseljenih područja	23
Slika 5. Računanje kuta nagiba Θ	24
Slika 6. Jukića gradina u ARKOD interaktivnoj karti	26
Slika 7. Jukića Gradina u ortografskom obliku ARKOD interaktivne karte (označeno žuto).....	26
Slika 8. Mogući način spajanja Jukića Gradine i HE Peruća cjevovodom u Google Earth-u	27
Slika 9. Razlika nadmorske visine između gornje i donje akumulacije.....	27
Slika 10. Simulacija izgleda gornje akumulacije i cjevovoda u Google Earth-u.....	27
Slika 11. Shema uz matematički model [19]	31
Slika 12. Definicija radne točke [20]	32
Slika 13. Odluka o pumpanju vode	35
Slika 14. Određivanje T_i	36
Slika 15. Određivanje volumena u spremniku	37
Slika 16. Godišnje opterećenje EES RH	38
Slika 17. Objašnjenje načina pohrane i puštanja vode [23]	39
Slika 18. Shema tjeranja vode pumpom i puštanja vode na turbinu_1 [25]	39
Slika 19. Shema tjeranja vode pumpom i puštanja vode na turbinu_2 [26]	40
Slika 20. Trenuci pumpanja vode i oduzimanja vode [27]	40
Slika 21. Razlika opterećenja s energijom i bez energije iz vjetroelektrana [28]	41
Slika 22. Krivulje opterećenja EES i proizvedene električne energije u vjetroelektranama za razdoblje od 6 dana.....	42
Slika 23. Snaga potrebna za pumpanje vode i proizvodnju električne energije na turbini	43
Slika 24. Određivanje snage potrebne za pumpanje vode i za proizvodnju električne energije	44
Slika 25. Usporedba opterećenja vjetra EES i proizvedene električne energije iz vjetroelektrana 1200 MW.....	46
Slika 26. Usporedba opterećenja EES i proizvedene električne energije iz vjetroelektrana 2400 MW.....	45
Slika 27. Usporedba opterećenja vjetra EES i proizvedene električne energije iz vjetroelektrana 3600 MW.....	48

POPIS TABLICA

Tablica 1. Inicijalne fizikalne karakteristike(uvjeti) za transformaciju[16]	22
Tablica 2. Pregled karakteristika odabrane lokacije	30
Tablica 3. Faktori opterećenja pumpi i turbina	47
Tablica 4. Pregled investicijskih troškova izgradnje i vrijednosti potrebnih za proračun[34]	49

1. UVOD

U okviru dosadašnjeg studija predstavljene su, kroz kolegije Osnove energetike i Mehanika fluida hidroelektrane, elektrane koje iskorištavaju hidropotencijal i proizvode električnu energiju na način da se potencijalna energija vode najprije pretvara u kinetičku energiju njezinog strujanja, a potom mehaničku energiju vrtnje vratila turbine, te konačno u električnu energiju u električnom generatoru.

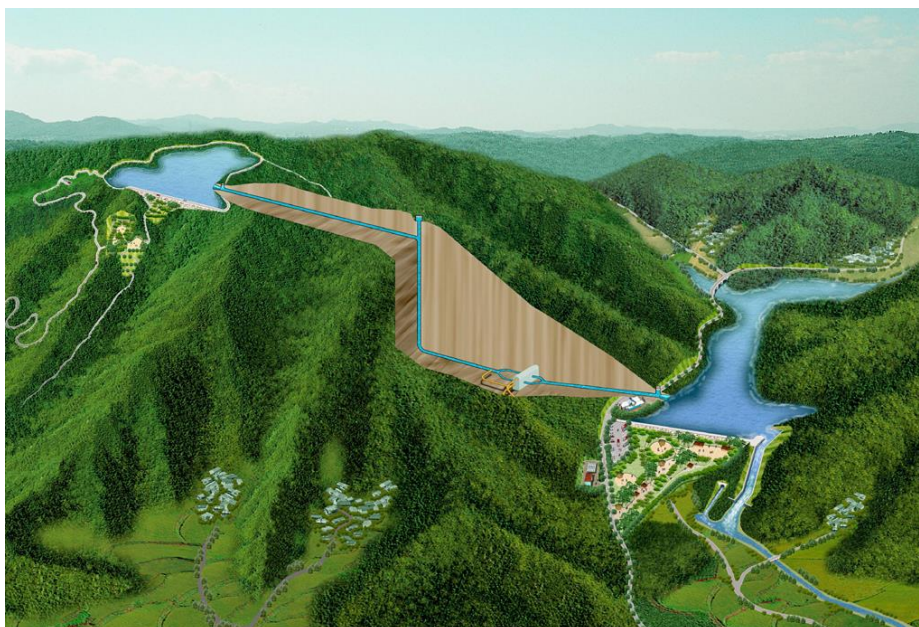
Nametnutim zajedničkim ciljem za postizanje energetskeg sustava zasnovanog na obnovljivim izvorima energije, RH ima obavezu ispunjavanja direktive koja uključuje porast udjela obnovljivih izvora energije u bruto finalnoj potrošnji energije. Poznavajući hidropotencijal RH, zaintrigirala me mogućnost izgradnje hidroelektrane na nekoj od vodenih površina ili tokova naše zemlje i uspješno iskorištavanje istoimenog potencijala. Stoga sam odlučio obraditi mogućnost i financijsku isplativost izgradnje jedne moderne hidroelektrane, tj. nadogradnju postojeće na jezeru Peruća. Izgradnjom bi se omogućila i veća penetracija vjetroelektrana u energetske sustav RH jer ovaj poseban tip hidroelektrane pretvara konvencionalne hidroelektrane u moderne spremnike energije koji u velikoj mjeri mogu "obuzdati" nepredvidljivu prirodu vjetra.

Pod nadzorom mentora, izrađen je jednostavan matematički model, odabrana lokacija i proračunata mogućnost pohranjivanja vode te predstavljena mogućnost rasterećenja glavnih elektrana u RH s "zelenim" oblicima energije. Temelj za početak rada bila je studija Instituta za energiju i transport pomoću koje je upoznata metodologija odabira idealne lokacije, poteškoćama pri biranju iste te metodologijom transformacije konvencionalne u reverzibilnu hidroelektranu. Proučavajući studiju analize financijskih mehanizama za potporu izgradnje reverzibilnih hidroelektrana i analize kombiniranog korištenja vjetra i istoimenih hidroelektrana, dobio se detaljniji uvid u financijsku isplativost izgradnje i način rada ovakvih sustava. Koristeći druge članke, studije, grafove i tablice dobivene od strane mentora, i navedene u literaturi, dana je što konkretnija i slika mogućnosti izgradnje navedene hidroelektrane, budući da RH ima velike hidropotencijale koji mogu uspjeti ostvariti želju mnogih, a to je energetske sustav baziran na čistim i obnovljivim izvorima energije, koji su stabilni i pouzdani u svakom trenutku, nadomještajući nedostatke vjetroelektrana i solarnih kolektora s izgradnjom hidroelektrana te povećavajući njihov utjecaj u pokrivanju opterećenja energetske mreže na dnevnoj, mjesečnoj i godišnjoj razini.

2. REVERZIBILNE HIDROELEKTRANE

2.1. Opis i način rada

Reverzibilne ili crpno-akumulacijske hidroelektrane predstavljaju posebnu vrstu hidroelektrane koja služi za pohranjivanje potencijala vode u spremnik. To znači da se voda pohranjuje kako bi se kasnije pomoću njenim puštanjem na turbinu proizvela električna energija. Za razliku od konvencionalnih hidroelektrana, kod kojih voda protječe kroz postrojenje iz akumulacijskog jezera i nastavlja dalje prirodnim tokom, ovakav poseban tip hidroelektrana ima dvije akumulacije vode koje se nazivaju gornjom i donjom akumulacijom.[1] Prikaz izgleda reverzibilne hidroelektrane dan je na slici 1.



Slika 1. Shema reverzibilne hidroelektrane [2]

Gornja i donja akumulacija su povezane cjevovodom(jednim ili više njih, ovisno o izvedbi). Pumpanje vode iz nižeg u viši spremnik odvija se u razdobljima niske potražnje električne energije u energetsom sustavu neke zemlje. Većim zahtjevom za električnom energijom voda se pušta natrag iz gornje u donju akumulaciju te prolazi kroz turbinu pri čemu se proizvodi električna energija. Moguće su dvije vrste postrojenja od kojih je jedna takva da su spremnici povezani s jednim cjevovodom u kojemu se nalazi reverzibilna turbina koja ima mogućnost prilagodbe režimu rada, tj. može raditi i kao pumpa i kao turbina, ovisno o tome da li treba pumpati vodu u gornju akumulaciju ili proizvoditi električnu energiju povratkom vode iz gornje u donju akumulaciju. U takvim postrojenjima se najčešće ugrađuju Francisove turbine. Druga mogućnost je

spajanje gornjeg i donjeg spremnika vode s dva cjevovoda kroz koje se vrši zasebno pumpanje i vraćanje vode te se tako izbjegava primoranost promjena režima iz pumpe u turbinu i obratno. Potreba za razvojem ovakve vrste hidroelektrana javila se sa željom za stabilizacijom elektroenergetskih sustava u kojima se želi kontrolirati proizvodnja električne energije, tj. sa željom da se najviše električne energije proizvodi onda kada su najveći zahtjevi za njom te tako izbjegnju viškovi proizvodnje koji se moraju odbaciti. Posebna pozornost je usmjerena na ovakvu vrste pohrane energije s razvojem drugih OIE poput vjetroelektrana, koje imaju nepredvidljivu prirodu i snagu, ali koji u razdoblju generiranja električne energije mogu jako puno pridonijeti u pokrivanju opterećenja elektroenergetskog sustava. Jednostavnim povezivanjem i usklađivanjem sustava može se iskoristavati energija vjetra u razdobljima niskog zahtjeva za pumpanje vode koju puštamo natrag na turbinu kada dođu vršna opterećenja. Primjenom ovakvog sustava proizvodnje energije, približava se mogućnosti potpune "kontrola" vjetroelektrana, tj. maksimalnom iskorištenju potencijala i snage vjetra. Pružanjem ovakve iskoristivosti, povećava se mogućnost penetracije obnovljivih izvora energije u elektroenergetske sisteme te se ujedno zadovoljavaju brojne propise Europske Unije vezane za korištenje "čistih" oblika energije. S druge strane, ovakvo skladištenje energije nije idealno uzimajući u obzir gubitke prilikom pretvorbe energije, gubitke strujanja vode kroz cjevovode, gubitke na elektromotorima i generatorima pumpe i turbine te gubitke uslijed isparavanja akumulirane vode. Maksimalan stupanj pretvorbe energije i vraćanje te energije varira od 70 do 85%, ovisno o vrsti izvedbe, vrsti akumulacijskih spremnika i uvjetima rada. Uzrok pada stupnja pretvorbe energije su efikasnosti pumpi i turbini te linijski gubici u dugim cjevovodima koji spajaju gornju i donju akumulaciju. Taj stupanj pretvorbe još više pada izgradi li se otvorena gornja akumulacija poput ove na slici 2.



Slika 2. Otvorena izvedba gornje akumulacije[3]

Uz navedene nedostatke bitno je napomenuti i ograničenja uzrokovana niskom gustoćom energije što nameće ili korištenje velike količine vode ili nametanje velike visinske razlike između gornje i donje akumulacije. Primjera radi, potencijalnoj energiji od 1 MWh odgovara količina vode od cca 4500 m³ ako se ona pušta sa vrha visokog 100 m od donje akumulacije. Stoga se postavlja zahtjev za postavljanjem što većeg i što višeg gornjeg spremnika kako bismo mogli skladištiti značajniju količinu električne energije u ovakvim postrojenjima. Ekonomičnost, isplativost i svrha ovakvih hidroelektrana očituje se u zamjeni termoelektrana i nuklearnih elektrana u smislu proizvodnje električne energije i pokrivanja zahtjeva elektroenergetskog sustava za električnom enrgijom jer navedene elektrane koriste skupo i ekološki neprihvatljivo gorivo u usporedbi sa reverzibilnih hidroelektranama. Uz to, spremanjem zalihe vode i brzim odzivom sustava, uspijevaju se ograničiti nestabilnosti frekvencije i napona mreže uzrokovane iznenadnim promjenama potražnje električne energije. Izgradnja reverzibilnih hidroelektrana može se izvršiti na dva načina o čemu ovisi i visina investicijskih troškova ovakvih postrojenja. Prvi način je transformacija postojećih hidroelektrana u one reverzibilnog tipa s izgradnjom novog gornjeg akumulacijskog spremnika čime se uzrokuju visoki investicijski troškovi, pogotovo ako je potrebno izravnavati i prilagođavati lokaciju za izgradnju. Drugi način je korištenje postojećeg prirodnog rezervoara vode poput potoka ili prirodno oblikovane brane, čime se investicijski troškovi smanjuju na izgradnju potrebnih cjevovoda za povezivanje spremnika. Isplativost izgradnje ovakvih hidroelektrana ovisi o feed-in tarifi, mogućnosti skladištenja, tj. pumpanja vode u gornji spremnik i mogućnosti izravnavanja outputa intermitentnih izvora energije poput PV i vjetra. Isplativost se povećava u slučajevima kada je cijena električne energije blizu nule ili čak i negativna što se događa u trenucima kada postoji više energije nego što opterećenje mreže može prihvatiti. Kako se to ne bi dogodilo, izgradnjom reverzibilnih elektrana se omogućava uklanjanje viškova koji bi se trošili na pumpanje vode po toj niskoj cijeni energije. Voda pohranjena u gornju akumulaciju bi se zadržavala sve dok cijena električne energije ne naraste odnosno dok sustav ne dođe u stanje vršnog opterećenja kada bi se pustila kroz turbinu i proizvodila električnu električnu energiju koja bi se "prodavala" u mrežu po višoj cijeni nego što je kupljena prilikom pumpanja vode. Sustavi s pumpanjem vode u gornji spremnik su izvedeni prvi puta 1890. godine u Švicarskoj i Italiji, ali se značajan pomak u ovom području napravio tek 1930. kada su izgrađene reverzibilne turbine s visokim stupnjem iskoristivosti. Vrhunac današnje tehnologije u postrojenjima su pumpe promjenjivih brzina vrtnje koje se prilagođavaju(sinkroniziraju) frekvenciji mreže kada proizvode električnu energiju.

2.2. Najmodernija i najveća postrojenja u svijetu[4]

Danas je instalirano preko 130 GW reverzibilnih hidroelektrana što čini oko 3% kapaciteta za proizvodnju električne energije, a najveće hidroelektrane ovog tipa su smještene u SAD-u i Kini koje su zemlje predvodnice u iskorištavanju pohrane energije pomoću vode.

2.2.1. *Bath Country*[5]

Trenutno najveće postrojenje reverzibilnog tipa s nazivnom snagom od 3003 MW zbog čega se često naziva "najvećom baterijom" na svijetu. Smještena je u državi Virginija u SAD-u i sastoji se od dva odvojena spremnika čija je razlika u nadmorskoj visini oko 380 m. Izvorno je postrojenje izgrađeno 1977. godine kao konvencionalna hidroelektrana nazivne snage 2100 MW ali se u razdoblju od 2004. do 2009. godine nadogradilo svih šest Francisovih turbina tvoreći danas najveću hidroelektranu ovog tipa. Gornja akumulacija može zaprimiti oko 44000000 m³ vode, dok je donja akumulacija manja i može zaprimiti oko 35000000 m³ vode. Cjevovodi koji spajaju spremnike su dugački oko 380 m, a ukupna iskoristivost ovog postrojenja je oko 79%. Hidroelektrana se odlikuje sposobnošću jako brzog prelaska iz režima pumpanja vode u režim proizvodnje električne energije, u svega nekoliko minuta.

2.2.2. *Guangdong(Guangzhou)*[6]

Najveće reverzibilno postrojene u Kini sastoji se od 8 turbini nazivne snage 300 MW(ukupno 2400 MW), a proizvedena električna energija koristi se za pokrivanje opterećenja u Hong Kongu. Postrojenje je izgrađeno tj nadograđeno s 4 na 8 turbina 2000. godine. Sastoji se od gornjeg i donjeg spremnika te podzemne stanice u kojoj se proizvodi električna energija i vrši pumpanje vode u gornji spremnik. Gornji spremnik zapremnine 23400000 m³, stvoren izgradnjom nasipa, i donji spremnik, stvoren izgradnjom brane, povezani su s dva cjevovoda koji se granaju u 4 grane i opskrbljuju turbinu vodom.

2.2.3. *Huizhou*[7]

Reverzibilna hidroelektrana nazivne snage 2448 MW koja se dobiva pogonom 8 generatorskih pumpi. Postrojenje koje je u potpunosti izgrađeno 2011. godine opskrbljuje se vodom iz gornjeg spremnika koji je stvoren pomoću dvije brane. Glavna brana je izgrađena pomoću betonskih valjaka, dok je druga, pomoćna brana, nasip. Nakon puštanja vode i proizvodnje električne energije, voda se otpušta u donji spremnik koji je stvoren pomoću betonskih valjaka koji čine branu. Postoji mogućnost pumpanja vode iz donjeg u gornji spremnik radi ponovnog korištenja.

2.2.4. Okutataragi[8]

Najveće postrojenje reverzibilnog tipa smješteno je na Japanskom otoku Honshu i ima titulu najveće crpno – akumulacijske stanice u toj zemlji s nazivnom snagom od 1932 MW. Konstrukcija i izgradnja ove hidroelektrane je završena 1974. godine, a sastoji se od 2 spremnika i crpne stanice u kojoj se pumpa voda i generira električna energija. Gornji spremnik, poznat pod imenom Kurokawa, ima kapacitet 33387000 m³, nazvan je tako jer je stvoren pomoću Kurokawa brane, smještene na rijeci Ichi. Donji spremnik imena Tataragi je također stvoren pomoću brane istog imena, a može zaprimiti 19440000 m³.

2.2.5. Ludington[9]

Drugo po veličini crpno-akumulacijsko postrojenje u SAD-u izgrađeno je u saveznoj državi Michigan krajem 1973. godine, a cijeli projekt izgradnje koštao je \$315000000 dolara. Postrojenje je nadograđeno 2013. godine kada je poboljšana efikasnost postrojenja za 9% te je generatorski kapacitet povećan na 2172 MW. Sadrži 6 reverzibilnih turbina koje su povezane s gornjim spremnikom putem 6 cjevovoda duljine 340 m. Umjetna gornja akumulacija ima zapremninu 102206120 m³ (slika 3.) , dok kao donja akumulacija služi jezero Michigan. Postrojenje može u 2 minute promijeniti režim rada te u narednih pola sata dostići nazivno opterećenje.

2.2.6. Fengning[10]

S predviđenim završetkom radova do kraja 2019. godine i puštanjem zadnje predviđene Francisove turbine do 2021. godine, Kina će postati zemlja s najvećom reverzibilnom hidroelektranom u svijetu nazivne snage 3600 MW. Investicijski troškovi izgradnje gornjeg i donjeg rezervoara te crpne stanice iznose \$1870000000. Gornji rezervoar, zapremne moći 66150000 m³, od kojih se 2/3 mogu koristiti za proizvodnju električne energije povezan je cjevovodom s crpnom stanicom, smještenom blizu donjeg spremnika koji ima mogućnost pohranjivanja 48830000 m³ vode od kojih se 80% može koristiti u radu reverzibilne hidroelektrane.

2.2.7. Kannagawa[11]

2020. godine Japan će postati vlasnikom druge najveće reverzibilne hidroelektrane ukupne nazivne snage 2820 MW kada će postrojenje sadržavati 6 Francisovih turbina. Postrojenje se planiralo izgraditi u 3 dijela dodavanjem po 2 turbine. Brana Minamiaiki i brana Ueno tvore 2 spremnika koja opremljena 6,1 km dugim cjevovodom i crpnom stanicom tvore klasično reverzibilno postrojenje za spremanje vode. Projekt je započeo 1995. godine, a trenutno se planira dodavanje zadnje dvije turbine. Spremnici mogu zaprimiti 19170000 m³ i 18400000 m³, razlikuju se 650 m u nadmorskoj visini što nadomještaju pumpe. Pumpe imaju mogućnosti ostvarivanja protoka od 510 m³/s.

2.2.8. Dniester(Dnjestar)[12]

Reverzibilna hidroelektrana koja kao izvor vode koristi rijeku Dnjestar planira se nadograditi sa dodatnih 5 turbina do 2017. godine kada će imati ukupnu instaliranu snagu od 2268 MW. Ovo postrojenje ujedno predstavlja i jedinu reverzibilnu hidroelektranu veću od 1000 MW sa službenim datumom završetkom radova u Europi. Izgradnja je započela još 1983. godine, ali su se radovi obustavili raspadom tadašnjeg Sovjetskog Saveza. Sve do 2009. godine se čekalo na puštanje prve turbine u pogon koja proizvodi energiju puštanjem vode iz gornjeg spremnika pod imenom Dniester I na 2 turbine koje su trenutno u pogonu. Prolaskom kroz turbinu i generiranjem električne energije, voda se odbacuje u donji spremnik imena Dniester II. Spremnici mogu pohraniti 70000000 m³ i 38800000 m³ te su visinski udaljeni 38 metara.



Slika 3. RHE Ludington [13]

Predstavnicima novih, modernih reverzibilnih hidroelektrana su tri velika projekta u Kini, Japanu i Ukrajini koji bi trebali s ukupnom nazivnom snagom od preko 10000 MW povećati utjecaj ovih "baterija" u elektroenergetskom sustavima i povećati udio u generiranju energije na globalnoj razini. Neke od hidroelektrana se nadograđuju, a neke se grade kao zasebna nova postrojenja. Uključimo li podatak da se do 2025. na svjetskoj razini planira izgraditi/nadograditi 15 hidroelektrana sa nazivnom snagom većom od 1000 MW, vidimo da reverzibilne hidroelektrane zauzimaju sve bitnije mjesto u proizvodnje električne energije.

3. ODABIR LOKACIJE GORNJEG AKUMULACIJSKOG JEZERA [14]

3.1. Definicija metodologije i kriteriji odabira lokacije

Koncept reverzibilnih hidroelektrana zahtjeva postojanje gornje i donje akumulacije između kojih se pumpa voda, većinom u trenucima koji ne odgovaraju vršnim zahtjevima za električnom energijom. kako bi se pohranila potencijalna energija vode. Pohranjena voda se pušta natrag prema donjoj akumulaciji kroz turbinu u trenucima vršnog opterećenja kako bi se proizvodila električna energija. Rezervoari (akumulacije) su povezani cjevovodom u kojemu je crpna stanica koja sadrži opremu za pumpanje i proizvodnju. Sukladno zadanom cilju od 1200 MW instalirane snage iz OIE do 2020, te uz veliki potencijal hidroenergije u RH koja može služiti kao spremnik energije, nužno je osmisliti i pokrenuti projekt izgradnje reverzibilnih hidroelektrana. Kao najprikladnije mjesto za izgradnju se nameće jezero Peruća [15] zbog povoljne geografske lokacije (smješteno u kotlini između planina Dinare i Svilaje), velike zapremnine (565250000 m^3) i velike površine ($20,1 \text{ km}^2$) te relativno niske nadmorske visine u odnosu na moguće lokacije izgradnje gornje akumulacije. Navedeno jezero pripada topologiji A(TA) za transformaciju u reverzibilne hidroelektrane, gdje postoji izgrađena konvencionalna hidroelektrana sa pripadajućom akumulacijom koja je ostvarena izgradnjom brane ili nasipa, a zadatak transformacije sastoji se od dodavanja prikladnog rezervoara na višoj nadmorskoj visini. Potrebno je definirati topologiju i fizikalne karakteristike te provjeriti određene pretpostavke. Nakon navedenih postupaka, povoljna mjesta za izgradnju koja zadovoljavaju kriterije, mogu biti podvrgnuta procjeni.

Procjena se sastoji od navedenog algoritma:

- Odabir lokacije korištenjem baze podataka o rezervoarima i interaktivnih karti polazeći od pretpostavke minimalne veličine akumulacije tj minimalnog kapaciteta kojeg se može pohraniti u navedenu akumulaciju
- ispitivanja teoretskog potencijala kojeg se dobije putem topografske analize, nakon određivanja veličine gornjeg spremnika, udaljenosti između spremnika i razlike u nadmorskoj visini između gornje i donje akumulacije
- ispitivanja fizikalnog potencijala nakon ispitivanja ispunjavaju li navedene i odabrane lokacije fizikalna ograničenja. Koristi se analiza fizikalnih ograničenja koja uključuje ispitivanje spadaju li lokacije u područje bilo kakve vrste zaštićenosti ili postojećeg načina iskorištenja poput zaštićenih područja pod UNESCO-m, prirodnih rezervata, korištenje u transportnoj infrastrukturi, korištenje (planiranje) izgradnje naselja i drugi

- analizom opterećenja mreže kojom ispituje se može li sadašnja mreže izdržati novonastalo opterećenje koje se javilo izgradnjom reverzibilne hidroelektrane dobivamo infrastrukturni potencijal tj lokacije koje obećavaju

Tablica 1. Inicijalne fizikalne karakteristike(uvjeti) za transformaciju[16]

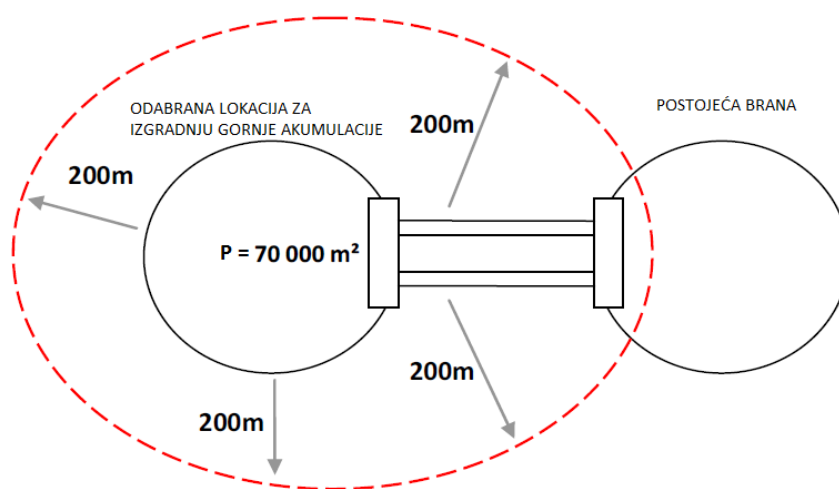
Minimalna veličina rezervoara	1000000	m ³
Minimalna vrijednost pohranjene energije	1000000	Wh
maksimalna udaljenost između rezervoara	5000	m
minimalna razlika u nadmorskoj visini između rezervoara	150	m
pretpostavka površine prema Topologiji A	700000	m ²
minimalna udaljenost od naseljenih područja	200	m
minimalna udaljenost od transportne infrastrukture	100	m
minimalna udaljenost od područja pod zaštitom UNESCO-a	5000	m
(lokacija ne bi smjela biti u području Natura 2000)		
maksimalna udaljenost do stabilne(prikladne) električne mreže	20000	m

Gore navedena tablica 1. daje pregled inicijalnih fizikalnih karakteristika i pretpostavki koje su iskustveno izvedene i zadane na temelju postojećih shema. Metodologija se bazira na postojećim branama, stoga su isključene sve hidroelektrane koje imaju kapacitet manji od 1000000 m³ i imaju nominalnu snagu manju od 1 MW. Prema TA, postojeći rezervoar može biti ili gornji ili donji za potencijalnu prenamjenu u reverzibilne hidroelektrane.

Kriteriji odabira lokacije:

- tip hidroelektrane – sve vrste postojećih hidroelektrana pogodne za transformaciju
- udaljenost između postojeće i nove zamišljene akumulacije ne smije biti veća od 5 km, potrebna duljina cjevovoda se računa na temelju elevacije gornje akumulaciju u odnosu na Peručko jezero
- nadmorska visina vrha(gornje akumulacije) trebala bi biti najmanje 150 m mjereći od nadmorske visine donje akumulacije(razlika u nadmorskim visinama)
- volumen i površina nove akumulacije – minimalni volumen je 1000000 m³ vode, a pretpostavka dubine je 20 m (moguća je izgradnja i dublje tj više akumulacije). Za 20 m duboku akumulaciju pretpostavka je minimalne površine vode od oko 50000 m². Uzimajući u obzir nasip i ostalu infrastrukturu, minimalna površina vode trebala bi biti oko 70000 m²

- ljudska prisutnost – nametnuta je zabrana za izgradnju ako se naseljeno područje nalazi u radijusu od 200 m od nove konstrukcije (slika 4.)

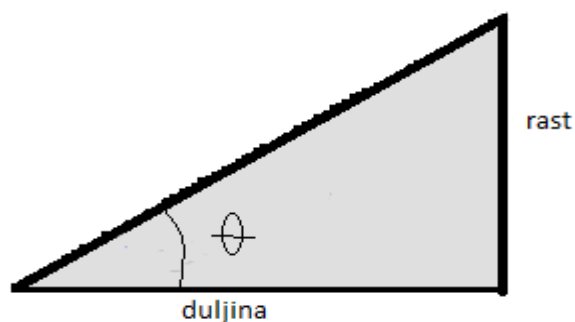


Slika 4. Udaljenost od naseljenih područja

- prisutnost prijevoznike/putničke infrastrukture – prisutnost iste ne smije biti u radijusu od 100 m mjereći od mjesta izgradnje akumulacije
- infrastruktura električne mreže – limitira se gradnja na područjima koji nisu unutar 20 km od prikladne električne mreže
- zaštićena područja – potencijalna mjesta izgradnje ne smiju biti pod zaštitom UNESCO-a ili u sklopu prirodnih rezervata (povijesna/arheološka mjesta, parkovi prirode, nacionalni parkovi, specijalna zaštićena područja i drugi)
- nagib terena izabranog za mjesto potencijalne izgradnje gornje akumulacije mora biti između 0 i 5 stupnjeva što se smatra relativno ravnim terenom. Nagib se računa pomoću kuta nagiba Θ kako slijedi:

$$\tan\Theta = \text{rast} / \text{duljina} \quad (1)$$

$$\%\Theta = \tan\Theta * 100 \quad (2)$$

Slika 5. Računanje kuta nagiba Θ

Navedeni kriteriji se zadovoljavaju biranjem potencijalnog mjesta za izgradnju pomoću geografskog informatičkog sistema(GIS) koji obuhvaća Google Earth, Natura 2000, ARKOD preglednik i , koji su korišteni prilikom odabira lokacije za Peruću.

Prepreke za ostvarivanje određenog potencijala:

1. geološke barijere
 - a) izvedivost izgradnje s obzirom na vrstu tla
 - b) narušavanje stabilnosti prirode gradnjom?
2. hidrologija
 - a) nedostatak površinskih voda
 - b) ulijevanje u potencijalni rezervoar
 - c) problem padalina i razina vode u rezervoaru
3. infrastruktura
 - a) narušavanje transportne infrastrukture
 - b) mogućnost izgradnje – tehnička izvedivost izgradnje
 - c) stabilnost električne mreže
 - d) dostupnost električne mreže
4. ekonomske barijere – isplativost izgradnje s obzirom na investicijske troškove i feed-in-tarifu
5. naseljenost – problem prihvaćanja projekta od strane lokalnog stanovništva
6. politička barijera – problem izgradnje ako su gornja i donja akumulacija u različitim državama(spomenuto jer već postoji jedna HE na granici RH i BIH)
7. prirodne barijere vezane uz promjenu okoliša
 - a) problem dobivanja dozvole za izgradnju blizu zaštićenih područja – utjecaj na pejzaž
 - b) utjecaj na floru i faunu – studija utjecaja na okoliš

8. problem opskrbe i kvalitete vode

- a) problem ako novi rezervoar treba služiti i kao spremnik pitke vode ili spremnik za navodnjavanje jer se u tom slučaju trebaju uskladiti funkcije akumulacije, promijeniti kvalitetu vode što može dovesti do nepovoljnog sastava vode za rad turbine i pumpe, promijeniti tj povećati volumen zapremnine što dodatno povećava troškove i veličinu akumulacijskog jezera

9. problem poplava – izgradnja rezervoara ne smije ni na koji način povećati opasnost od poplava i havarije

3.2. Odabir lokacije

Pretraživanjem GIS karti pronađeno je par lokacija koje bi mogle zadovoljavati većinu navedenih kriterija:

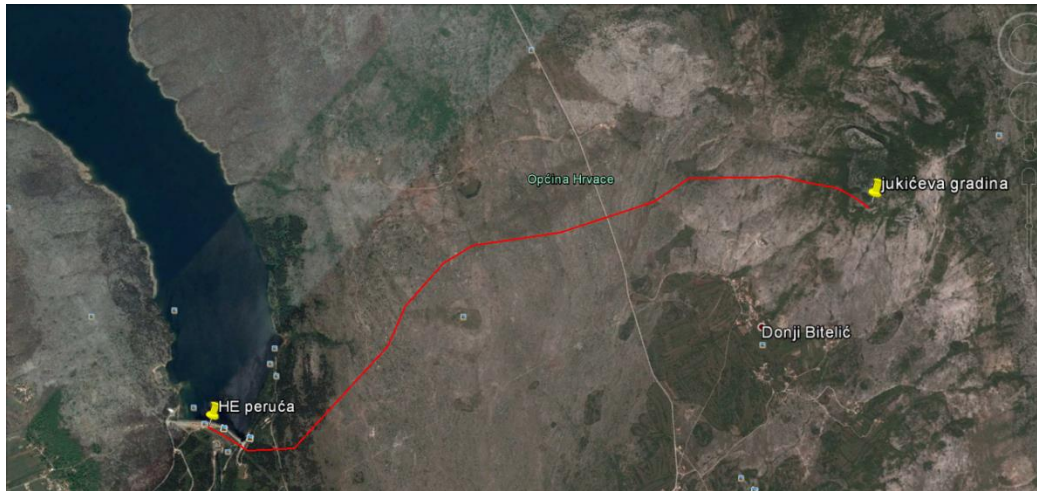
- Orlovača – 852 m
- Golo brdo – 932 m
- Lovorica dolac – 562 m
- Vučipolje – 603 m
- Jelinjak – 1126 m
- Jukića gradina – 769 m

Nakon detaljnije razrade i prolaska kroz postupak zadovoljavanja svih kriterija, posebno obraćajući pozornost na ispunjavanje uvjeta izbjegavanja blizine naseljenih područja i područja koja su pod zaštitom UNESCO-a ili u sklopu prirodnih rezervata(NATURA 2000), najpogodnijom lokacijom se smatra Jukić gradina, smještena sjeveroistočno od postojeće hidroelektrane na jezeru Peruća. Lokacija je odabrana usporednim gledanjem i istraživanjem dviju karti: Google Earth[17] i ARKOD[18] karte koja pruža informacije o blizini naselja, nagibu terena i zaštićenim područjima.

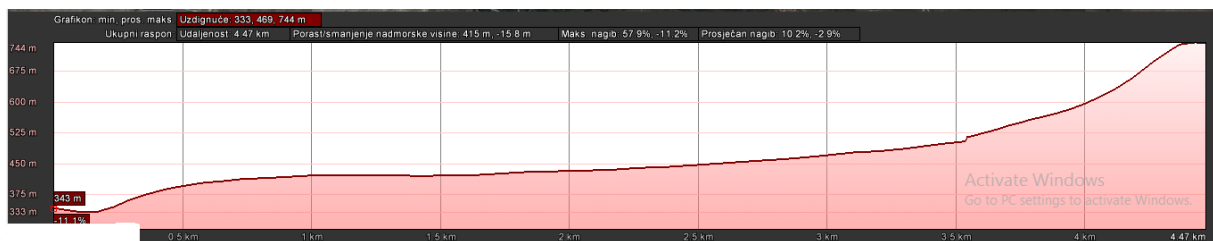
Geografske koordinate odabrane lokacije:

43°49' S

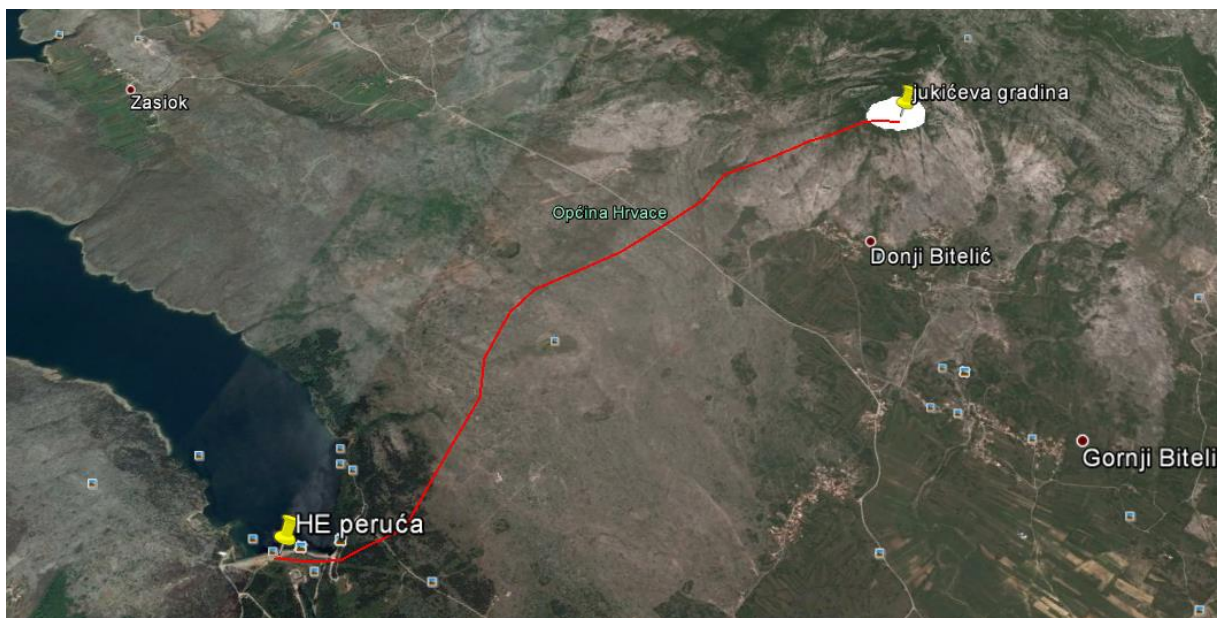
16°37' I



Slika 8. Mogući način spajanja Jukića Gradine i HE Peruća cjevovodom u Google Earth-u



Slika 9. Razlika nadmorske visine između gornje i donje akumulacije



Slika 10. Simulacija izgleda gornje akumulacije i cjevovoda u Google Earth-u

Razlika nadmorskih visina dobivena je pomoću funkcije u Google Earth-u, kao i duljina potrebnog cjevovoda. Na slici je bijelim krugom označena veličina spremnika gornje akumulacije čije vrijednosti su iznijete u sljedećoj točki.

3.3. Ukupni raspoloživi kapacitet akumulacije

Teoretska pohranjena energija računa se prema izrazu:

$$E = \frac{\rho * g * H * V * \eta}{3600} \quad [Wh] \quad (3)$$

$$V = A * h \quad [m^3] \quad (4)$$

$$A = 0,25 * d^2 * \pi \quad [m^2] \quad (5)$$

$$\rho = 1019 \text{ kg/m}^3$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$H = H_{\text{akumulacija}} - H_{\text{Peruća}} = 769 - 362 = 407 \text{ m} \rightarrow \text{uzima se } 370 \text{ m (objašnjeno u nedostacima)}$$

$$d = 650 \text{ m} \rightarrow \text{izgrađuje se spremnik kojemu je baza kružnog oblika promjera } d$$

$$h = 30 \text{ m}$$

$$A = 330000 \text{ m}^2$$

$$V = 9,95 \times 10^6 \text{ m}^3$$

$$\eta = 0,8$$

Uvrštavanjem vrijednosti dobivamo teoretsku pohranu energije u iznosu od:

$$E = 9,2 \text{ GWh}$$

Potrebna duljina cjevovoda se očitala iz Google Earth-a/ARKOD-a i iznosi :

$$L = 4500 \text{ m}$$

Predviđena vodena površina gornje akumulacije:

$$A = 330000 \text{ m}^2$$

Predviđeni volumen vode koji je moguće pohraniti u gornjoj akumulaciji:

$$V = 9950000 \text{ m}^3$$

3.4. Prednosti lokacije

Odabrana lokacija Jukić Gradina odlikuje se velikom razlikom nadmorske visine u odnosu na hidroelektranu na jezeru Peruća čime postižemo veliku teorijsku energiju pohrane vode. Lokacija ispunjava zahtjeve svih minimalnih udaljenosti propisanih u propisima za transformaciju hidroelektrane u onu reverzibilnog tipa te zahtjev maksimalne dopuštene duljine cjevovoda od donje do gornje akumulacije. Dodavanjem spremnika na odabrano područje moguće je pohraniti 9,95 GWh što je ekvivalentno konstantnom pumpanju vode u gornji spremnik od oko 8 sati ako imamo 1200 MW instalirane snage vjetra i vršno opterećenje tj maksimalnu dobivenu energiju tijekom cijelog navedenog razdoblja. Također, postoji mogućnost varijacije površine gornje akumulacije prema potrebi proračuna zbog zadovoljavanja kriterija minimalnih udaljenosti od naseljenih područja, transportne infrastrukture i ostalih.

3.5. Nedostaci lokacije

Nedostatak lokacije je relativno neravan teren čime je izvođač radova primoran izravnati teren što uzrokuje povećanje investicijskih troškova i dovođenje u pitanje isplativosti cijelog projekta transformacije u reverzibilnu hidroelektranu. Također, izravnavanjem terena se smanjuje razlika u nadmorskoj visini između donje i gornje akumulacije (uzima se 370 m umjesto 408 m) čime se smanjuje iznos teoretski pohranjene energije. Zbog 4500 m dugog cjevovoda nameće se pitanje pada tlaka u cjevovodu, odnosno odgovarajući izbor materijala i izvedbe samog cjevovoda što može rezultirati povećanim troškovima zbog visoke cijene kvalitetnih materijala cijevi. Uz to, veća duljina cjevovoda povećava i troškove izvedbe izgradnje i troškove održavanja tako duge dionice.

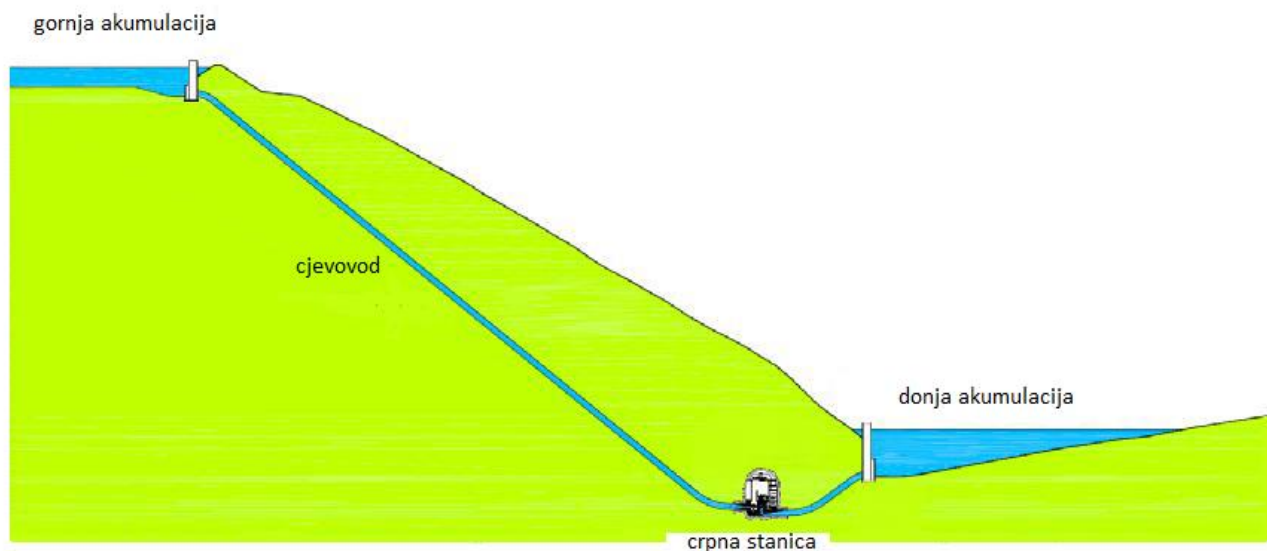
Cjelokupni prikaz uvjeta koje lokacija Jukića Gradina treba zadovoljavati za uspješno provedenu transformaciju tj. izgradnju gornje akumulacije prikazan je u tablici 2. U tablici se navode i geografske karakteristike odabrane lokacije.

Tablica 2. Pregled karakteristika odabrane lokacije

Ime lokacije		Jukić gradina
Koordinate		43°49' s ; 16°37' i
Nadmorska visina		769 m
Razlika nadmorskih visina		370 m
Nagib terena		Ne zadovoljava
Minimalna udaljenost:		
Naseljeno područje		Zadovoljava
Transportna infrastruktura		Zadovoljava
Zaštićena područja		Zadovoljava
Infrastruktura el. Mreže		Zadovoljava
Duljina cjevovoda		4500 m
Izvan zaštićenog područja		Zadovoljava

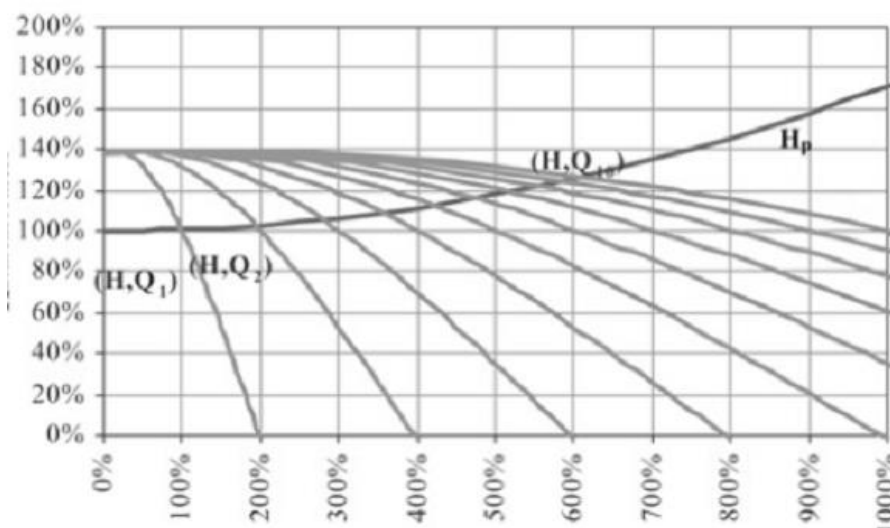
4. JEDNOSTAVAN MATEMATIČKI MODEL REVERZIBILNE HIDROELEKTRANE

Proračun tj. matematički model reverzibilne hidroelektrane sastoji se od proračunavanja visine dobave pumpe odnosno turbine u trenucima kada su oni opterećeni. Shema na slici 11. daje jednostavan prikaz osnovnih dijelova reverzibilne hidroelektrane: gornji i donji rezervoar, podzemna crpna stanica sa pumpom, cjevovod za pumpanje vode u gornji rezervoar i cjevovod kojim bi se voda vraćala iz gornjeg u donji rezervoar. Obično se turbina smješta u tom povratnom cjevovodu otkuda se električna energija distribuira u električnu mrežu.



Slika 11. Shema uz matematički model [19]

Radna točka pumpe tj. crpne stanice proračunava se pomoću sjecišta karakteristike pumpe koja predstavlja prikaz rada pumpe za određene protoke i karakteristike cjevovoda koja predstavlja gubitke energije u cjevovodu zbog trenja prilikom protoka vode i zbog lokalnih gubitaka. Na temelju te vrijednosti, mogu se izračunati podatci potrebni za proračun postrojenja.



Slika 12. Definicija radne točke [20]

Jednadžba nam daje povezanost karakteristike pumpe i karakteristike cjevovoda:

$$H_p(Q) = H + \xi * Q^2 \quad [\text{m}] \quad (6)$$

Radna točka turbinskog postrojenja tj postrojenja za proizvodnju električne energije računa se analogno radnoj točki pumpe tj pomoću sjecišta karakteristike vodene turbine i karakteristike cjevovoda. Jednadžba nam za slučaj turbine daje povezanost njene karakteristike i karakteristike cjevovoda:

$$H_T(Q) = H + \xi * Q^2 \quad [\text{m}] \quad (7)$$

Kao što je rečeno ranije, karakteristika cjevovoda predstavlja svojevrsni gubitak energije koji nastaje protjecanjem vode kroz cjevovod uslijed djelovanja trenja i zbog lokalnih gubitaka u cjevovodu na mjestima skretanja protoka, proširenja i suženja u cjevovodu i na mjestu eventualnog grananja protoka. Koeficijent gubitka u cjevovodima računa se prema izrazu:

$$\xi = \lambda * \frac{L}{D_p} * \frac{1}{2 * g * A^2} + k * \frac{1}{2 * g * Q^2} \quad [-] \quad (8)$$

Koeficijent trenja λ može se računati prema brojnim izrazima, poput Colebrooke-White formule koja se rješava iterativnim postupkom:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 * \log\left(\frac{2,51}{Re * \sqrt{\lambda}} + \frac{\varepsilon_s}{3,71}\right) \quad [-] \quad (9)$$

Reynoldsov broj je definiran izrazom koji uključuje brzinu strujanja vode, promjer cjevovoda i kinematsku viskoznost ν : $Re = v * \frac{D_p}{\nu} \quad [-] \quad (10)$

Drugi nepoznati član u formuli za koeficijent trenja je relativna hrapavost ε_s koja se izračunava kao omjer apsolutne hrapavosti i promjera cjevovoda: $\varepsilon_s = \varepsilon/D_p$ [-] (11)

Promjer cjevovoda računa se prema maksimalnoj dopuštenoj brzini strujanja vode u samom cjevovodu, odnosno prema maksimalno dopuštenom protoku vode. Ograničenja mogu biti nametnuta zbog mogućnosti pojave kavitacije, mogućnosti pojave buke prilikom strujanja kroz cjevovod i brojna druga.

$$D_p = \frac{4Q_{max}}{(V_{max}*\pi)^{1/2}} \text{ [m] , gdje je } V_{max} = 0.125 * (2gH)^2 \text{ [m/s]} \quad (12) \text{ i } (13)$$

Prethodno prikazani proračun omogućuje dimenzioniranje sustava, tj određivanje potrebnog promjera cjevovoda za ostvarivanje zadanog protoka vode[21]. Matematički model na osnovu satne bilance sastoji se od proračunavanja volumena(protoka) vode koji se pumpa iz donjeg u gornji rezervoar(akumulaciju). Volumen se izračunava na temelju razlike energije vjetra u danom trenutku i opterećenja električne mreže tj zahtjeva za električnom energijom prema izrazu (14). Jednostavnim preračunavanjem razlike energije u volumen korištenjem modificiranog izraza (18) za teoretsku pohranjenu energiju u spremniku, ispunjava preduvjet za određivanje satne bilance prema dolje navedenim izrazima (19) – (20).

$$P = P_{vjetar} - P_{opt} \text{ [Wh/h]} \quad (14)$$

$$E = \frac{\rho * g * H * V * \eta}{3600} \text{ [Wh]} \quad (15)$$

U izrazu (15) je u brojniku broj 3600 s kojim pretvaramo [J] u [Wh]. Podijelimo li gornju jednadžbu s vremenom(u h) dobivamo izraz za snagu u ovisnosti o protoku vode:

$$P_i = \frac{\rho * g * H * Q}{\eta} \text{ [Wh/h]} \quad (16)$$

$$T_i = \rho * g * H * Q * \eta \text{ [Wh/h]} \quad (17)$$

Iz izraza (16) dobivamo protok koji se pohranjuje u gornju akumulaciju:

$$Q = \frac{P * \eta}{\rho * g * H} \text{ [m}^3\text{/h]} \quad (18)$$

Pošto je ovo satni model gdje je vrijeme pumpanja $t = 1$ h, uvrštavanjem te vrijednosti dobivamo:

$$V = Q * t \text{ [m}^3\text{]} \quad (19)$$

Izraz (19) predstavlja volumen vode koji se pohranjuje u gornju akumulaciju ili volumen vode koji se odvodi iz akumulacije kroz turbinu prema jezeru Peruća. U izrazu (20) koji predstavlja satnu bilancu volumena spremnika sa P_i je označena količina vode ekvivalentna energiji koju je motor

pumpe utrošio za pohranu vode u gornju akumulaciju, dok je sa T_i označena količina vode ekvivalentna energiji proizvedenoj u generatoru turbine. Obje oznake se iskazuju u [Wh/h] te se primjenom formula (18) i (19) dobiva količina vode koja je ekvivalentna snazi pumpanja, tj količina vode koja se u jednom satu za određenu snagu pumpanja prebaci iz donje u gornju akumulaciju. Primjeni li se satni model na više sati, dobiva se da je volumen u gornjem rezervoaru u zadanom trenutku(satu) jednak volumenu u gornjoj akumulaciji koji je zatečen u prethodnom satu uvećan ili umanjen za volumen vode koji smo dobili transformacijom P_i odnosno T_i .

$$V_{GA,i} = V_{GA,i-1} + V_p - V_t = V_{GA,i-1} + \frac{P_i * \eta}{\rho * g * H} - \frac{T_i}{\rho * g * H * \eta} \quad [\text{m}^3] \quad (20)$$

Prvi dio proračuna koji se odnosi na dimenzioniranje koristio se pri određivanju cijene proizvedene električne energije, dok se drugi dio proračuna(model) koristi za određivanje mogućnosti pohrane energije. Postoje ograničenja pohrane i oduzimanja vode koja su nametnuta dostupnosti mjesta u spremniku za pohranu odnosno dostupnosti vode za oduzimanje. Napuni li se spremnik do vrha, nije moguće dalje pumpati vodu u spremnik, a taj višak energije koji se ne može pohraniti se smatra odbačenom energijom vjetra. S druge strane, nedostaje li vode u spremniku za pokrivanje opterećenja, ostatak koji se mora nadomjestiti nekim drugim izvorom energije smatra se nedostatkom vode u akumulaciji odnosno manjkom energije u postrojenju. Sljedeći algoritmi su samostalno razvijeni uz dostupnu literaturu[21] i korišteni su u programu Microsoft Excel pri izračunavanju traženih vrijednosti.

Godišnje napumpana voda dobivena je kao ukupni zbroj svih pumpanja vode u jednom satu za cijelu godinu(8760 sati) te se gore navedenim izrazom transformira u ekvivalentnu vrijednost u [Wh/h] napumpane vode. Bitno je naglasiti da se GNV pumpa korištenjem samo električne energije iz vjetroelektrana.

$$GNV = \sum_{n=1}^{8760} V_{p,i} \quad [\text{Wh}] \quad (21)$$

Godišnje proizvedena električna energija dobivena je kao zbroj svih ekvivalentnih vrijednosti puštene vode iz gornjeg spremnika u turbinu na satnoj razini za cijelu godinu. Ekvivalentna vrijednost vode se također dobila korištenjem izraza (16) za transformaciju količine vode. Iznos GPE uključuje i početni uvjet koji govori da je gornja akumulacija u početnom trenutku 50% puna.

$$GPE = \sum_{n=1}^{8760} V_{T,i} \quad [\text{Wh}] \quad (22)$$

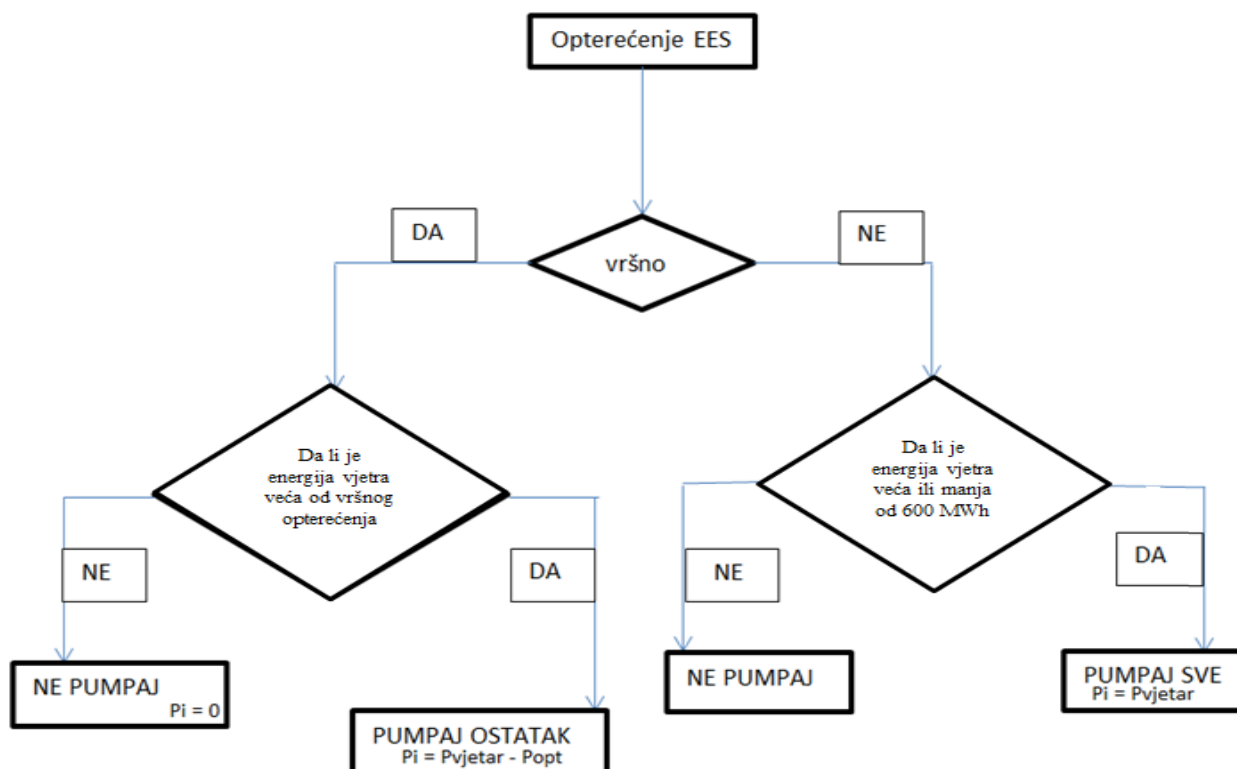
Odbačena energija vjetra smatra se onom energijom koju nismo mogli pohraniti zbog ograničenja veličine zapremnine gornjeg spremnika kojeg smo zbog tehničke izvedivosti ili investicijskih

troškova morali zadržati na dimenzioniranim veličinama. Iznos odbačene energije vjetra dobili smo zbrajanjem odbačene energije u jednom satu na razini cijele godine.

$$OEV = \sum_{n=1}^{8760} (\text{odbačena energija vjetra u jednom satu}) \quad [\text{Wh}] \quad (23)$$

4.1. Odluka o pumpanju vode i određivanje ekvivalente vrijednosti energije pumpanja P_i

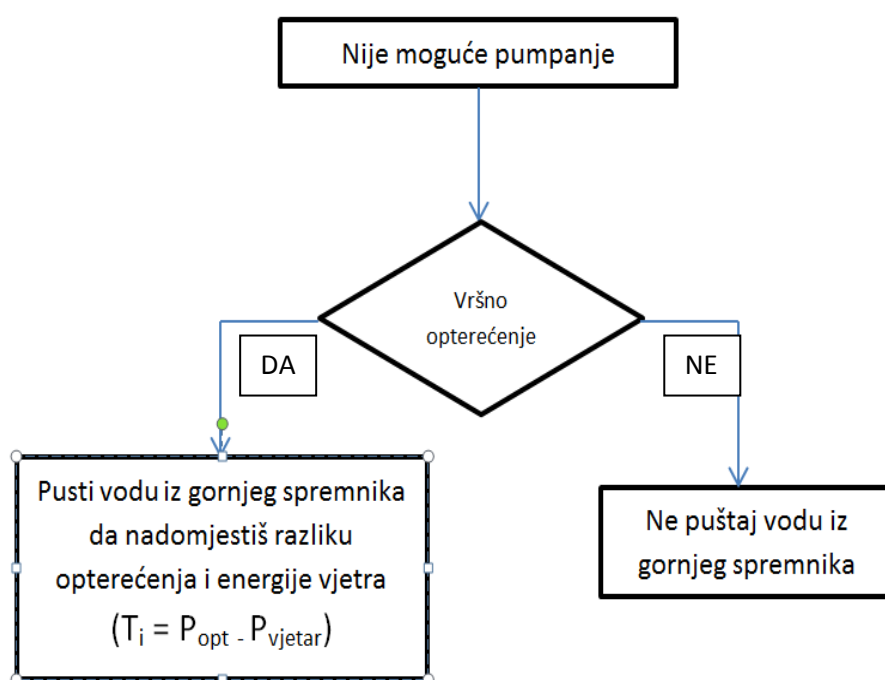
Odluka u pumpanju vode donosi se na temelju dva uvjeta a to su iznos opterećenja elektroenergetskog sustava i iznos energije vjetra. Ovisno o tome je li opterećenje vršno ili ne (prvi logički operator), imamo dva danja slučaja. Ako je opterećenje vršno, gleda se je li energija vjetra veća ili manja od tog vršnog opterećenja koje predstavlja zahtjev za električnom energijom. Usporedbom te dvije veličine dobivamo dva slučaja, a to su odluka o ne izvršavanju pumpanja vode u gornju akumulaciju i odluka o pumpanju razlike energije vjetra i vršnog opterećenja jer u tom je slučaju energija vjetra veća i nadomješta sve zahtjeve za električnom energijom. S druge strane, ako opterećenje nije vršno, razvijaju se dva slučaja ovisno o iznosu energije vjetra. Ako je energija vjetra manja od 600 MWh, donosi se odluka o ne izvršavanju pumpanja, a ako je energija vjetra veća, pumpa se cjelokupni iznos energije vjetra, tj. koristi se sva raspoloživa energija vjetra u tom trenutku za pumpanje vode u gornji spremnik. Objašnjene odluke su prikazane shemom na slici 13.



Slika 13. Odluka o pumpanju vode

4.2. Određivanje ekvivalentne vrijednosti energije oduzimanja T_i

U slučaju da nema pumpanja vode, prelazi se na određivanje ekvivalentne vrijednosti energije oduzimanja vode iz gornje akumulacije. U ovisnosti o iznosu opterećenja elektroenergetskog sustava postoje dva moguća ishoda. Ako opterećenje pripada vršnom opterećenju, odlučuje se puštati vodu iz gornje akumulacije u onoj količini koja bi nadomjestila razliku opterećenja i energije vjetra u tom satu. S druge strane, ako nije slučaj vršnog opterećenja, voda se ne oduzima iz gornjeg spremnika. Navedeni slučajevi su prikazani na slici 14. Važno je napomenuti da se ovaj algoritam koristi samo za određivanje ekvivalentne vrijednosti T_i , dok se mogućnost oduzimanja vode i razina vode u spremniku obuhvaća sljedeći algoritmom pod 3).

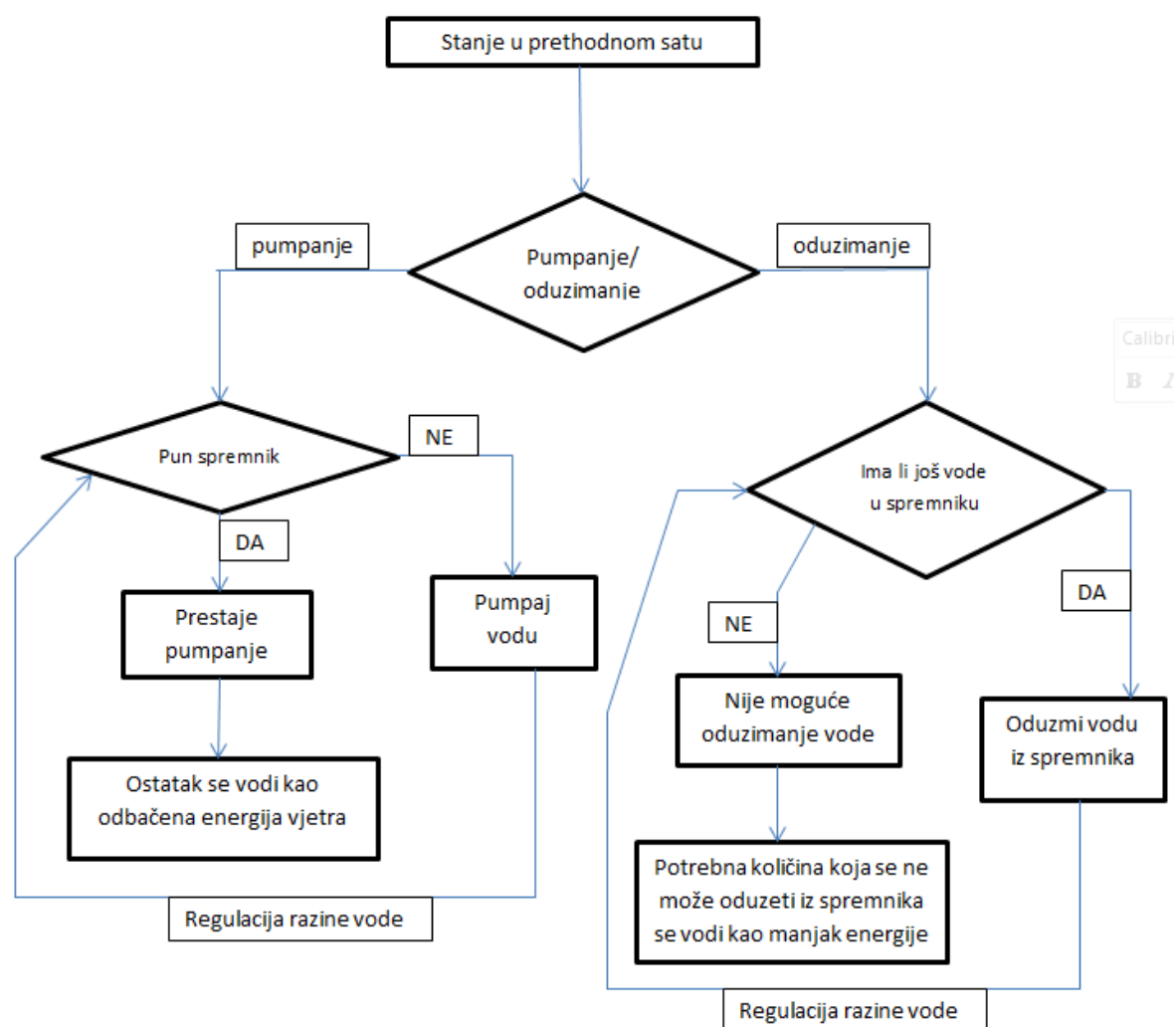


Slika 14. Određivanje T_i

4.3. Određivanje volumena vode u spremniku

Volumen vode u gornjoj akumulaciji na kraju svakog sata se određuje korištenjem satne bilance matematičkog modela prema izrazu (20). U ovisnosti da li je potrebno pumpati ili oduzimati vodu, logičkim operatorom se prelazi na sljedeći korak. Kod pumpanja se prvo provjerava stanje vode u spremniku, tj. je li spremnik pun do vrha. Ako vlada takva situacija, nemoguće je dalje pumpati vodu te pumpanje prestaje, a energija koju je trebalo pohraniti u spremnik se smatra odbačenom energijom vjetra. U slučaju da je u spremniku postoji mjesto za pohranu vode, uključuju se pumpe te tjeraju vodu prema gornjoj akumulaciji u iznosu koji odgovara ekvivalentu P_i (volumen koji se

prenese u gornji spremnik se dobiva korištenjem izraza (18) i (19)). Dogodi li se da za vrijeme pumpanja napunimo spremnik do vrha, pretpostavlja se da će regulator razine vode u spremniku spriječiti daljnju pohranu vode te će se pumpanje prekinuti. Eventualni ostatak koji u tom slučaju nije bilo moguće pohraniti se smatra odbačenom energijom vjetra. Ako je potrebno oduzimati vodu, prvi korak je provjera dostupnosti vode u gornjoj akumulaciji. Ukoliko nema vode u spremniku, nije moguće oduzimati vodu, a potrebna količina vode koja nedostaje za nadomještanje opterećenja elektroenergetskog sustava se smatra manjkom energije odnosno nedostatkom vode u akumulaciji. S druge strane, prisutnošću vode u gornjoj akumulaciji, ostvaruje se oduzimanje vode čijim se prolaskom kroz turbinu proizvodi električna energija. Dogodi li se za vrijeme oduzimanja da nestane vode u spremniku, pretpostavlja se da će regulator razine vode u spremniku prekinuti daljnje oduzimanje vode. Eventualni ostatak koji u tom slučaju nije bilo moguće oduzeti se smatra manjkom energije odnosno nedostatkom vode u akumulaciji. Objašnjeni slučajevi su shematski prikazani na slici 15.

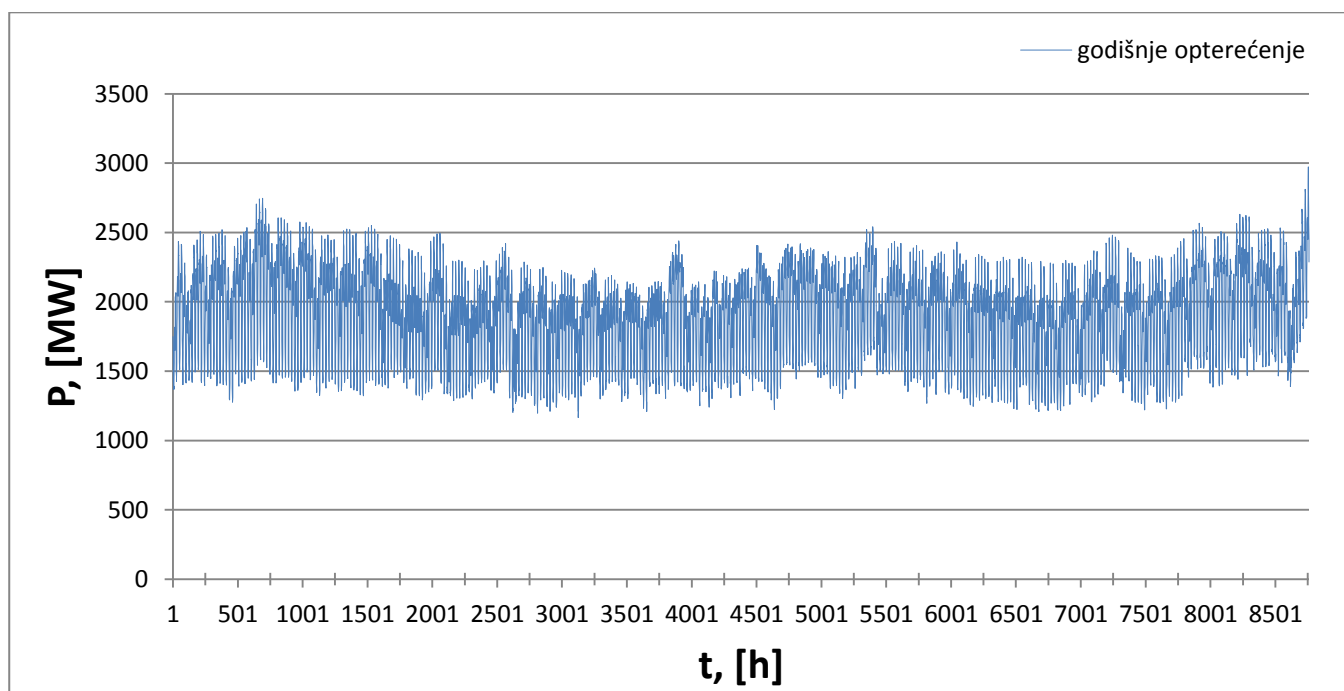


Slika 15. Određivanje volumena u spremniku

5. MOGUĆNOST SKLADIŠTENJA ELEKTRIČNE ENERGIJE IZ VJETROELEKTRANA

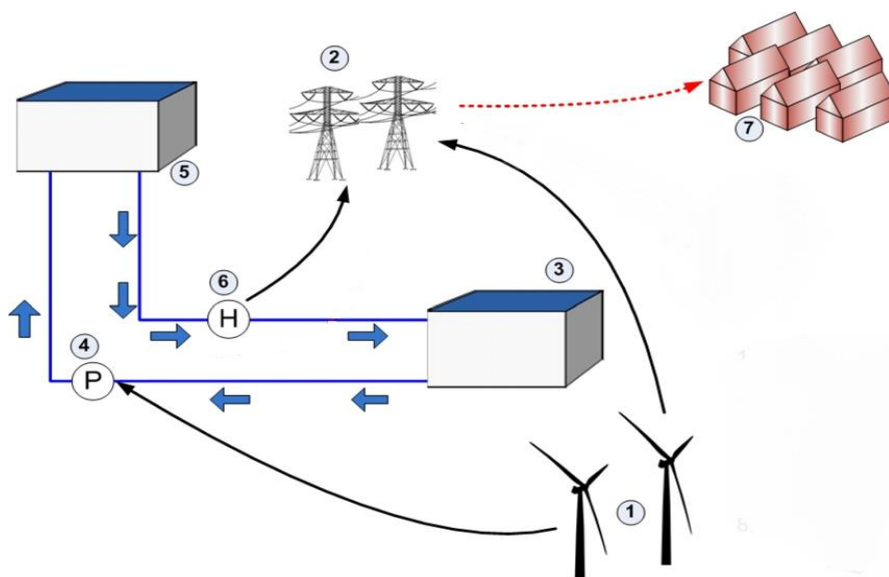
5.1. Pretpostavke i način skladištenja energije

- Instalirana snaga vjetra: 1200 MW , 2400 MW , 3600 MW
- Iznos satnog dobitka energije dobivena je u excel tablici od strane mentora
- Iznos satnog opterećenja električne preuzet je na internetu [22] te je prikazan na slici 16.
- Višak energije se skladišti u 2 slučaja (inače se voda iz gornjeg spremnika pušta na turbinu, ako je prethodno pohranjena u njega): kada satno opterećenje ne prelazi 80% dnevnog vršnog opterećenja u navedenom danu i kada u takvom "niskom" opterećenju energija vjetra iznosi > 600 MWh/h (uvjet iznosa energije vjetra je prikazan zelenom krivuljom na slici 22.) i kada energija vjetra ima veću vrijednost od vršnog opterećenja u navedenom danu
- U spremniku mora biti dovoljno mjesta za pohranu napumpane vode a u početnom trenutku u njemu se nalazi 50% maksimalnog volumena, a volumen donjeg spremnika (Jezero Peruća) smatra se dovoljno velikim da uvijek ima dovoljno vode
- visina između razine vode u gornjoj i donjoj akumulaciji smatra se konstantnom i jednaka je proračunatoj razlici u nadmorskoj visini od 370 m
- zanemaruje se isparavanje vode, svi gubici su obuhvaćeni stupnjem korisnosti $\eta = 0,8$ u koji je uključena i pretpostavka jednakog stupnja djelovanja pumpe i turbine



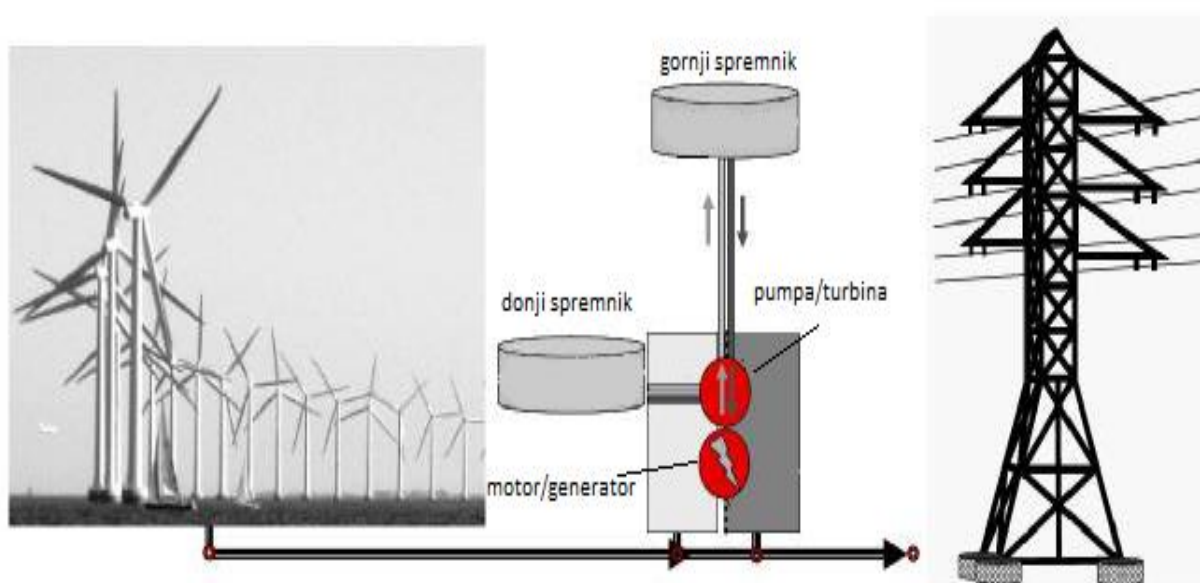
Slika 16. Godišnje opterećenje EES RH

Način pohrane i prikazan je slici 17, dok su sheme rada postrojenja u režimu pumpanja i u režimu proizvodnje električne energije prikazane na slikama 18. i 19.

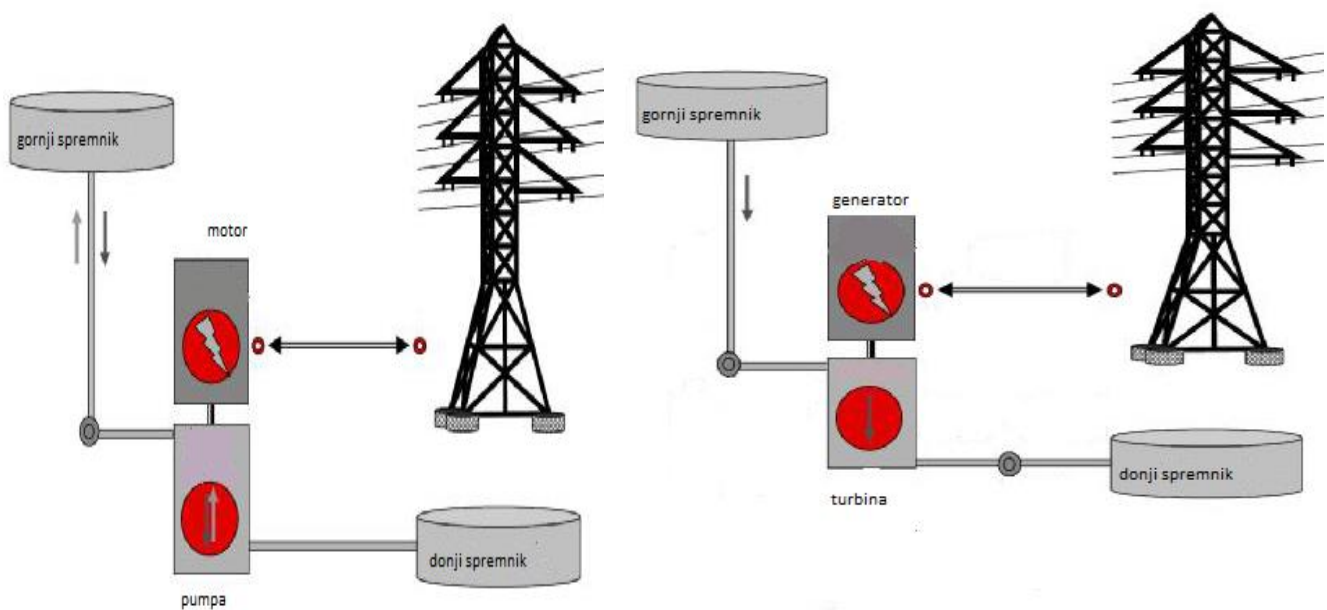


Slika 17. Objasnjenje načina pohrane i puštanja vode [23]

Energija vjetra(1) koristi se za pogon pumpe(4) koja tjera vodu iz donje akumulacije(3) u gornju akumulaciju pa s takvim režimom rada ne koristimo nikakvu dodatnu energiju za pogon pumpe. Voda je pohranjena u gornjem spremniku sve dok ne dođu vršna opterećenja kada se voda, ako je ima, pušta na turbinu(6) čime se proizvodi električna energija koja se direktno odvodi u električnu mrežu(2) putem koje se dobivena električna energija iz reverzibilne hidroelektrane distribuira po kućanstvima i ostalim potrošačima[24].

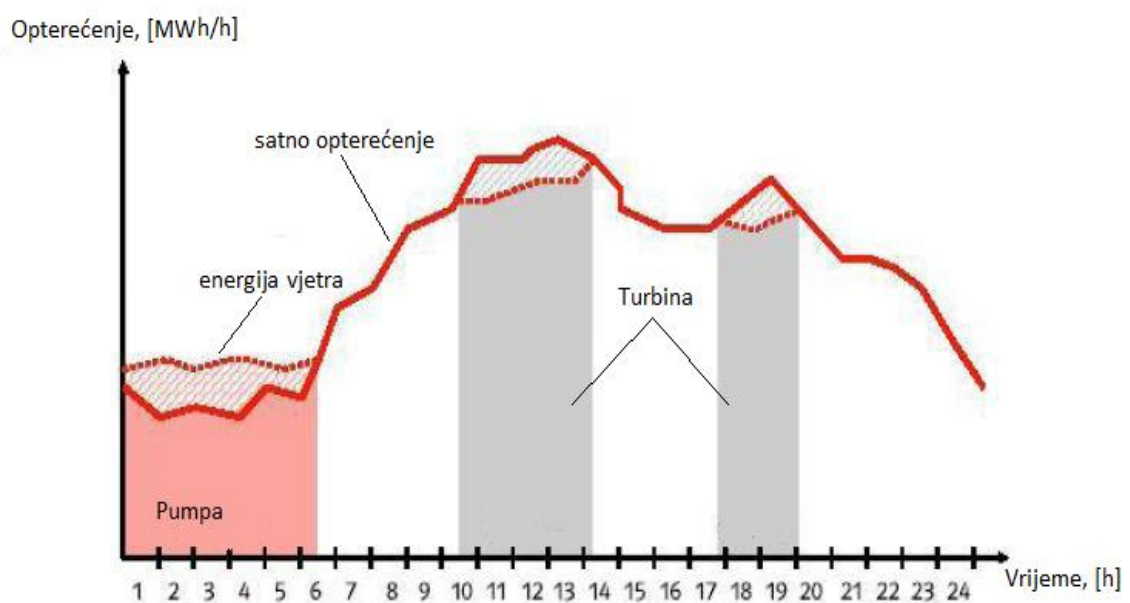


Slika 18. Shema tjeranja vode pumpom i puštanja vode na turbinu_1 [25]



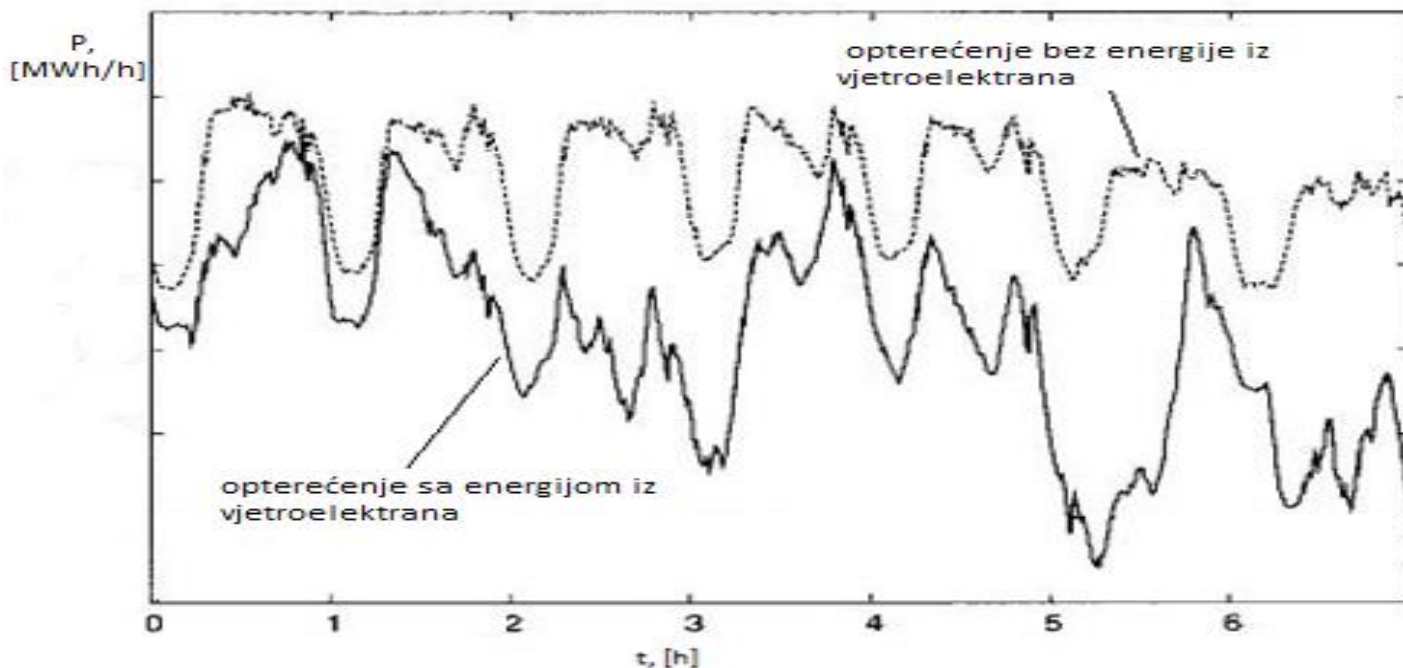
Slika 19. Shema tjeranja vode pumpom i puštanja vode na turbinu_2 [26]

Trenutci pumpanja vode u spremnik i oduzimanja vode iz spremnika za proizvodnju električne energije prikazani su na slici 20. Na prikazanoj slici se prate pretpostavke o uključivanja pumpi i o oduzimanju vode iz gornje akumulacije koje su označeni kao uvjeti pumpanja i oduzimanja. Prema njima se vidi da se u slučaju kada je energija vjetra veća od satnog opterećenja uključuje pumpa, a kada je slučaj vršnog opterećenja elektroenergetskog sustava, proizvodi se električna energija prolaskom oduzete vode iz gornje akumulacije kroz turbinu.



Slika 20. Trenuci pumpanja vode i oduzimanja vode [27]

Slika 21. prikazuje razliku između satnog opterećenja bez energije iz vjetroelektrana tj. zahtjev za električnom energijom i satnog opterećenja sa energijom iz vjetroelektrana tj. onda kada se satno opterećenje umanjuje za iznos energije vjetra u pojedinom trenutku. Napomene radi, vrijednosti na grafu su nasumično nacrtane i ne pripadaju proračunu za reverzibilnu hidroelektranu na Perući, već su iscrtane samo sa svrhom pojašnjenja razlike opterećenja sa i bez energije iz vjetroelektrana.



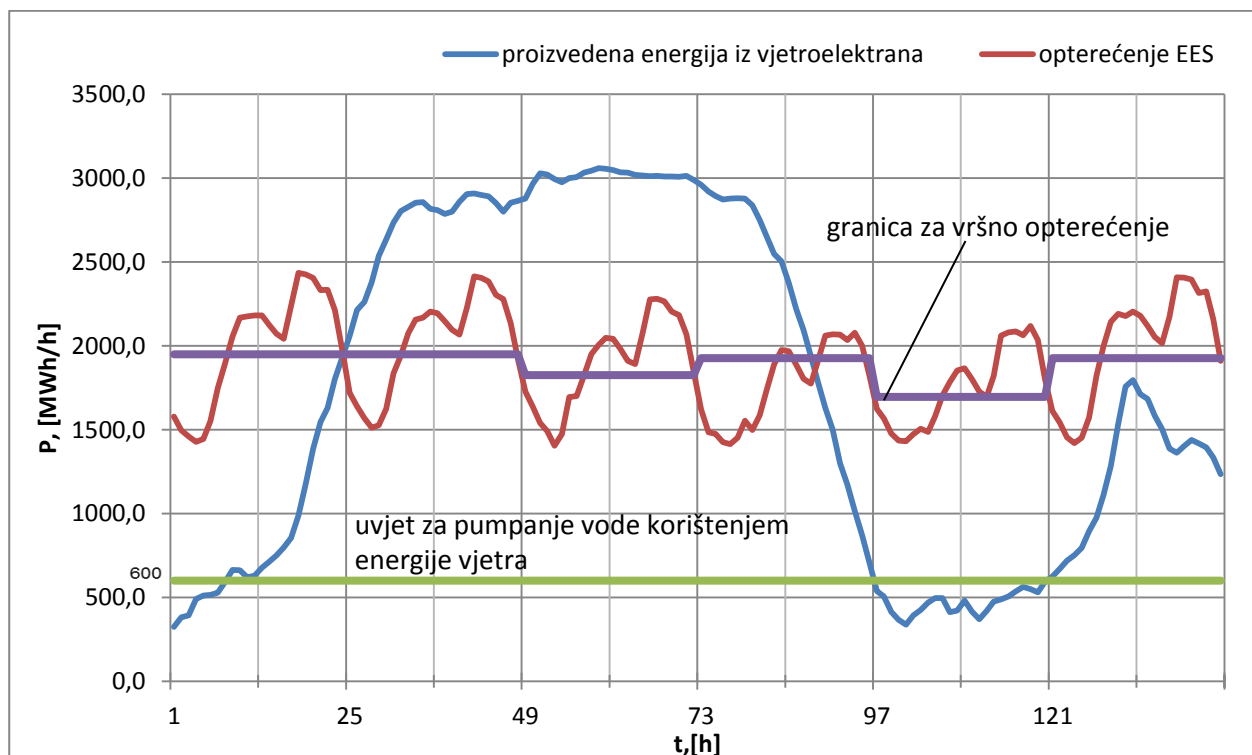
Slika 21. Razlika opterećenja s energijom i bez energije iz vjetroelektrana [28]

Kao što je prethodno rečeno, voda se pumpa u gornji spremnik kada je proizvedena električna energija iz vjetroelektrana veća od satnog opterećenja. Također je bitno napomenuti da se uvijek teži turbinskom režimu rada u vršnim opterećenjima navedenog dana kako bi se što bolje iskoristila spremljena energija vjetra i na taj način smanjio uvoz električne energije. Smanjenjem proizvodnje energije u drugim elektranama, smanjujemo troškove pogona drugih elektrani i povećavamo isplativost naše reverzibilne hidroelektrane te dobivamo čistu obnovljivu energiju s kojom ne zagađujemo okoliš. Mogu se dogoditi 2 krajnja slučaja u radu reverzibilne hidroelektrane:

1. vršno opterećenje/nema vode – u tom slučaju reverzibilna hidroelektrana ne može dati svoj doprinos u pokrivanju opterećenja, već se to opterećenje nadomješta nekim drugim izvorom energije poput nuklearne elektrane ili termoelektrane
2. situacija pogodna za pumpanje vode/spremnik pun – u ovom slučaju gubi se energiju jer se ne može pohraniti u gornji spremnik koji je pun. U ovakvim slučajevima je pogodno pustiti vodu na turbinu iz gornjeg spremnika kako bi se omogućilo pumpanje vode, a samim time

bi se i proizvodila električna energija iako nije vršno opterećenje u danu (u ovakvim situacijama najpogodnije je postrojenje sa odvojenim cjevovodima pumpe i turbine)

U slučaju uspješnog pokrivanja opterećenja i uključivanja energije vjetra na satnoj razini pomoću reverzibilnih hidroelektrana, može se postići slučaj kada se svakog sata može "računati" na doprinos energije vjetra, bilo direktnim pretvaranjem u električnu energiju u samim vjetroturbinama, bilo putem puštanja pohranjene vode na turbinu koja se prethodno pohranila u gornji spremnik.

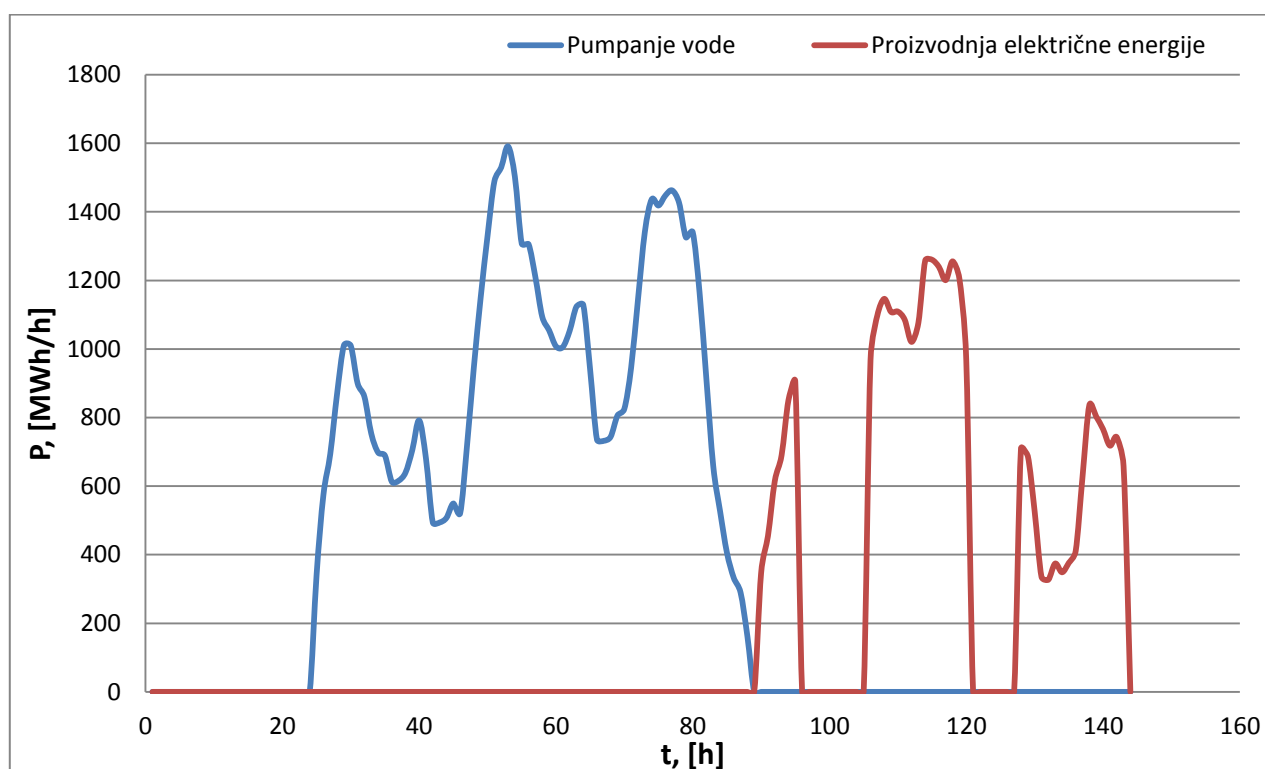


Slika 22. Krivulje opterećenja EES i proizvedene električne energije u vjetroelektranama za razdoblje od 6 dana

Na slici prikazani su mogući realni slučajevi pri radu reverzibilne hidroelektrane. Linijama su prikazani uvjeti za pumpanje vode, a to su uvjet za pumpanje vode korištenjem energije vjetra (zelena linija) i granica za vršno opterećenje (ljubičasta linija). Ostale dvije linije predstavljaju opterećenje EES i proizvedenu električnu energiju iz vjetroelektrana. Kada opterećenje EES nije veće od 80% vršnog opterećenja, ostvario se prvi preduvjet za moguće pumpanje vode. Drugi uvjet koji treba ispuniti je taj da je energija vjetra veća od 600 MWh. Također, treba paziti na uvjet dostupnosti pohraniti traženu količinu vode u gornju akumulaciju kako se voda ne bi prelila i izazvala havariju. Drugi slučaj mogućeg pumpanja je kada je energija vjetra veća i od samog vršnog opterećenja EES. Tada se koristi energiju vjetra za pokrivanje cjelokupnog opterećenja sustava, a ostatak se pohranjuje u spremnik, također pazeći na postojanje slobodnog odgovarajućeg volumena

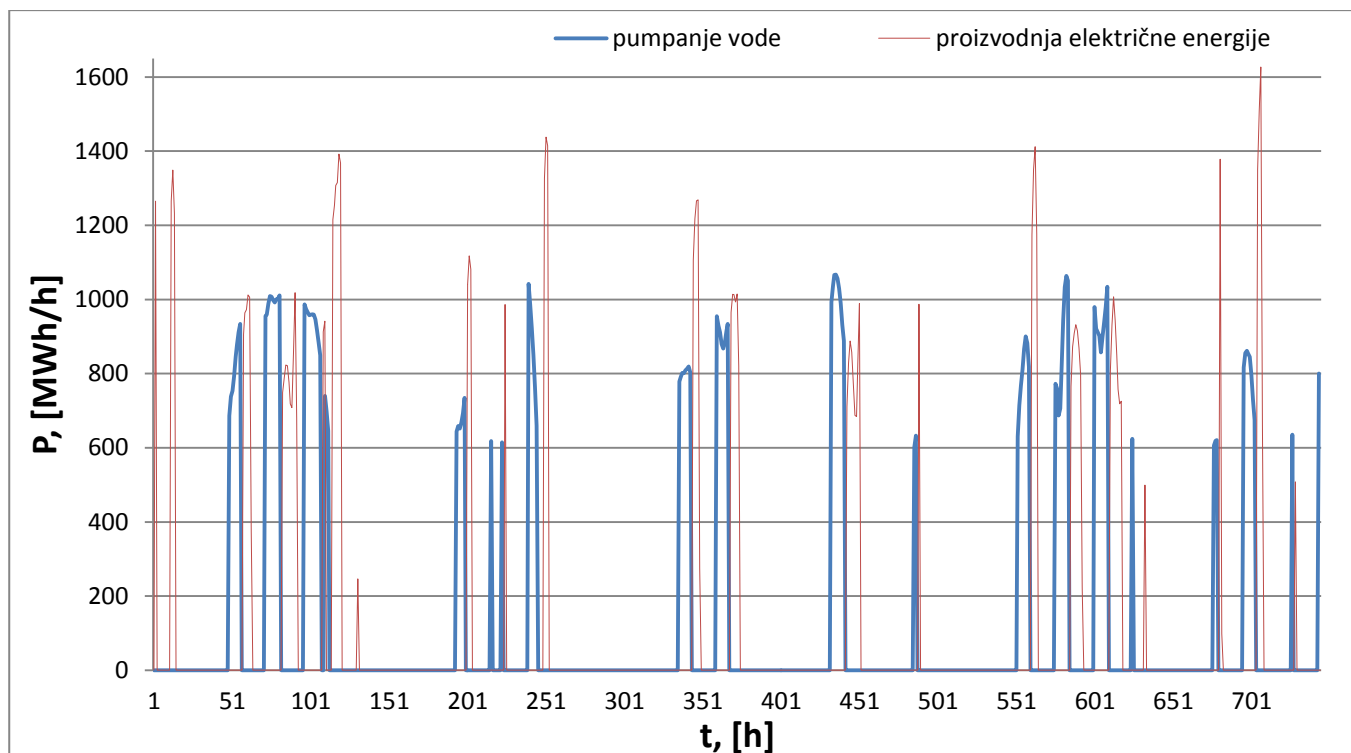
Fakultet strojarstva i brodogradnje

spremnika za primitak vode. U situacijama kada je nema energije vjetra veće od 600 MWh, pumpe se ne uključuju i ne pumpaju vodu u gornji spremnik već energija vjetra izravno pridonosi pokrivanju opterećenja sustava tj izravno se apsorbira iz vjetroelektrana u električnu mrežu. Zadnji mogući slučaj je slučaj kada imamo energiju vjetra veću od 600 MWh, ali smo u trenutku vršnog opterećenja mreže. Tada se pumpe ne uključuju u pogon, već se pripomaže pokrivanju opterećenja sa vjetrom i na taj način se "rasterećuju" ostale elektrane koje koriste skuplja goriva. Prikaz snaga pumpe i turbina potrebnih za pumpanje vode i proizvodnju električne energije u navedenom slučaju prikazani su na slici 23.



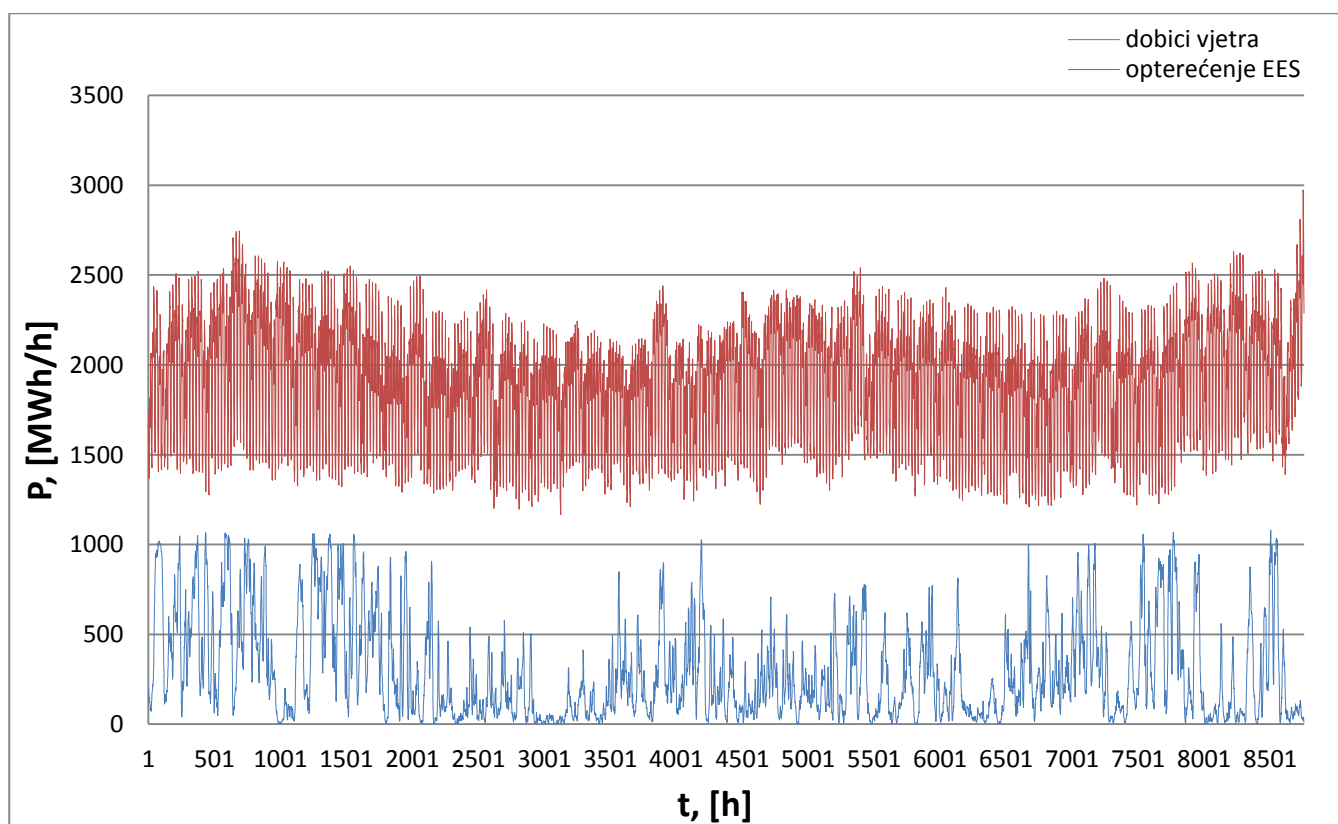
Slika 23. Snaga potrebna za pumpanje vode i proizvodnju električne energije na turbini

Maksimalne vrijednosti potrebne snage za pumpanje i proizvodnju električne energije na turbini se određuju iz gore prikazanog grafa, a ova metoda je korištena i pri određivanju vrijednosti u idućim točkama rada gdje se trebala odrediti mogućnost skladištenja vode za instalirane snage vjetra od 1200 MW, 2400 MW i 3600 MW. Grafovi su iscrtni u Microsoft Excelu, a primjer za maksimalnu vrijednost instalirane snage od 1200 MW prikazan je na slici 24. Prikazan je graf na mjesečnoj razini za mjesec siječanj u kojemu je maksimalno opterećenje. Krivulje proizvodnje električne energije u grafu na slici 24. su veće od krivulja pumpanja energije jer je mjesec siječanj prvi mjesec rada postrojenja, a pretpostavka je da je gornja akumulacija u početnom trenutku 50% napunjena vodom.



Slika 24. Određivanje snage potrebne za pumpanje vode i za proizvodnju električne energije

5.2. Instalirana snaga vjetroelektrana: 1200 MW



Slika 25. Usporedba opterećenja EES i proizvedene električne energije iz vjetroelektrana 1200 MW

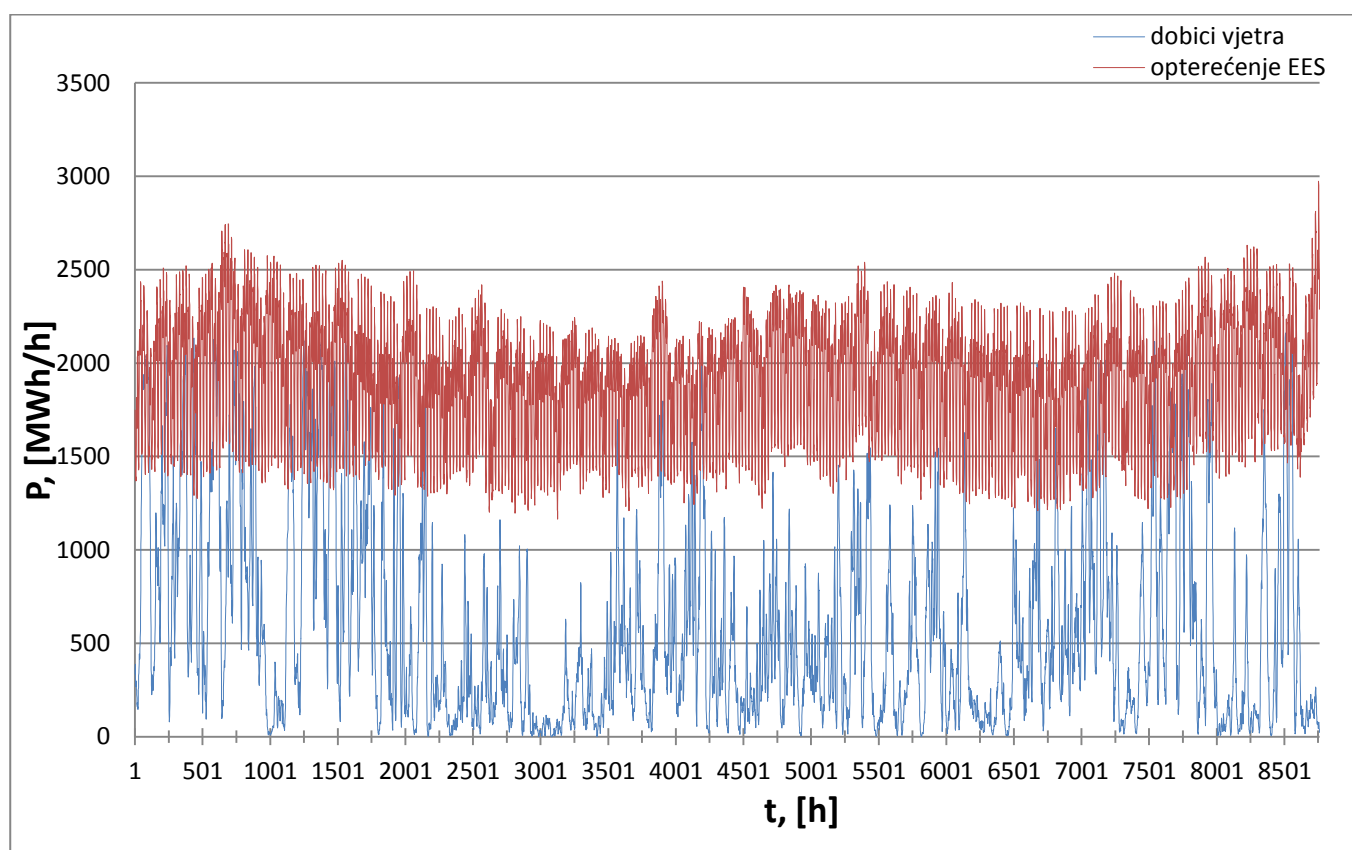
$$GNV = \sum_1^{8760} P_{i,1200\text{ MW}} = 363186 \text{ MWh}$$

$$GPE = \sum_1^{8760} T_{i,1200\text{ MW}} = 295660 \text{ MWh}$$

$$OEV = \sum_1^{8760} O_{i,1200\text{ MW}} = 0 \text{ MWh}$$

Instaliranjem vjetroelektrana nazivne snage 1200 MW postiže se situacija da nema odbačene energije vjetra tj da nema trenutaka kada se gornja akumulacija ispuni vodom do vrha, odnosno ispuni cijela zapremnina akumulacije, ali se s druge strane vidi da energija vjetra niti u jednom satu nije u mogućnosti nadomjestiti opterećenje EES. Voda se pumpa u gornju akumulaciju samo u satima kada nije vršno opterećenje i kada je energija vjetra veća od 600 MWh. Maksimalna snaga koju treba ostvariti u režimu pumpanja u jednom satu je 1067 MW, dok se u režimu proizvodnje električne energije treba ostvariti 2943 MW što bi značilo da bi se postrojenje sastojalo od 6 paralelno spojenih reverzibilnih turbina nazivne snage 500 MW od čega bi maksimalno 3 radile u pogonu pumpanja.

5.3. Instalirana snaga vjetroelektrana: 2400 MW



Slika 26. Usporedba opterećenja EES i proizvedene električne energije iz vjetroelektrana 2400 MW

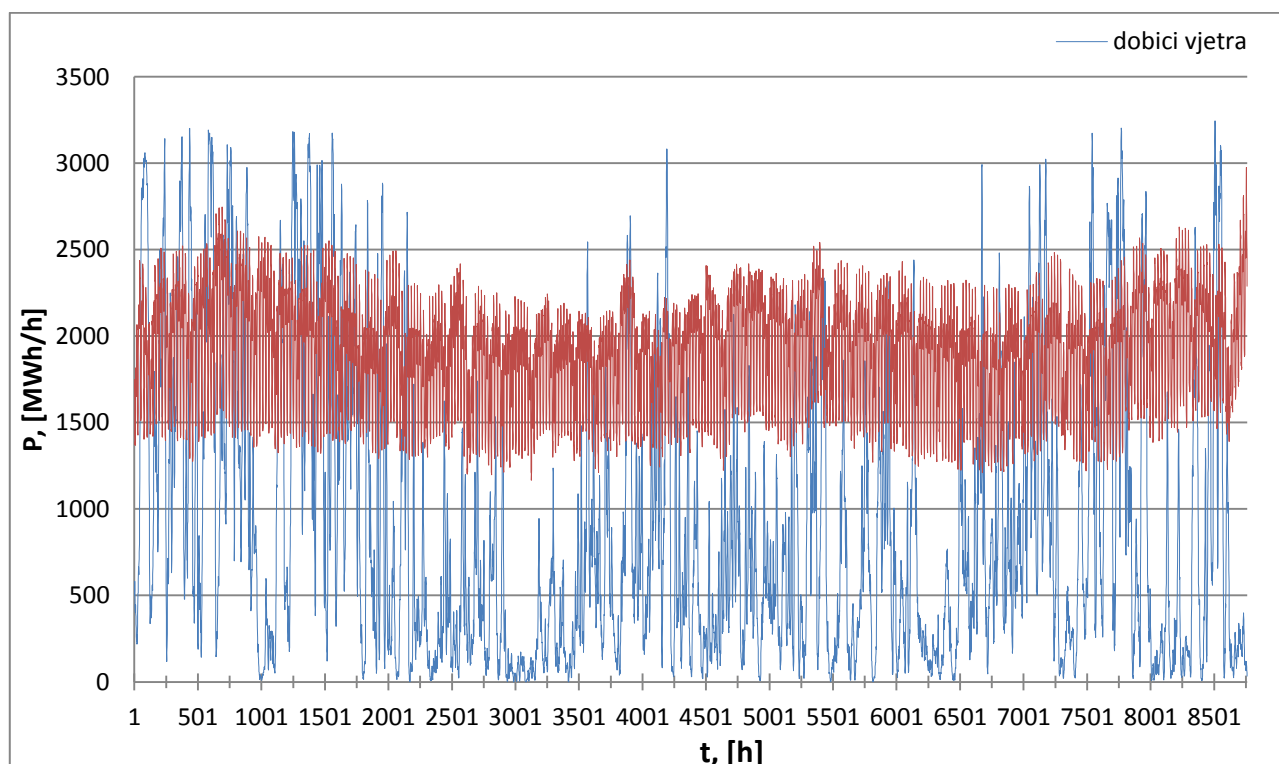
$$GNV = \sum_1^{8760} P_{i,2400 MW} = 833231 \text{ MWh}$$

$$GPE = \sum_1^{8760} T_{i,2400 MW} = 671696 \text{ MWh}$$

$$OEV = \sum_1^{8760} O_{i,2400 MW} = 10609 \text{ MWh}$$

Povećanjem instalirane snage vjetroelektrana sa 1200 MW na duplu vrijednost (2400 MW) pumpamo neznatno više vode u spremnik i neznatno više i proizvodimo električne energije. Također postoji i izvjesna vrijednost odbačene energije vjetra što je posljedica zahtjeva za pumpanjem kada je spremnik gornje akumulacije pun i nije mogao pohraniti vode. Posljedica relativno male razlike u GNV i GPE je nepovoljan profil puhanja vjetra koji se nije bitno razlikovao od onoga pri nazivnom opterećenju od 1200 MW što je rezultiralo i sličnom količinom električne energije iz vjetroelektrana. Maksimalna snaga koju treba ostvariti u režimu pumpanja u jednom satu je 1966 MW, dok se u režimu proizvodnje električne energije treba ostvariti 2912 MW što bi značilo da bi se postrojenje sastojalo od 6 paralelno spojenih reverzibilnih turbina nazivne snage 500 MW od čega bi maksimalno 4 radile u pogonu pumpanja, a svih 6 u pogonu proizvodnje energije iz otpuštene vode iz gornje akumulacije.

5.4. Instalirana snaga vjetroelektrana: 3600 MW



Slika 27. Usporedba opterećenja vjetra EES i proizvedene električne energije iz vjetroelektrana 3600 MW

$$GNV = \sum_1^{8760} P_{i,3600 MW} = 1628145 \text{ MWh}$$

$$GPE = \sum_1^{8760} T_{i,3600 MW} = 1307627 \text{ MWh}$$

$$OEV = \sum_1^{8760} O_{i,3600 MW} = 880297 \text{ MWh}$$

Vjetroelektrane sa nazivnom snagom od 3600 MW daju i veliku količinu napumpane vode kroz godinu i veliku godišnju proizvedenu električnu energiju, ali imaju i nedostatak odbacivanja jako velike vrijednosti energije vjetra. Način smanjenja odbačene energije vjetra je povećavanje veličine zapremnine vode u gornjoj akumulaciji čime rastu investicijski troškovi čime se dovodi u pitanje isplativost same takve izgradnje. Financijskom analizom isplativosti trebalo bi se predvidjeti isplativost projekta poveća li se volumen spremnika na dovoljno veliku zapremninu da pohrani odbačenu energiju vjetra u ovom slučaju, odnosno usporediti povrat investicije u slučaju izgradnje i u slučaju izgradnje veće gornje akumulacije. Maksimalna snaga koju treba ostvariti u režimu pumpanja u jednom satu je 2025 MW, dok se u režimu proizvodnje električne energije treba ostvariti 2882 MW što bi značilo da bi se postrojenje sastojalo od 6 paralelno spojenih reverzibilnih turbina nazivne snage 500 MW od čega bi maksimalno 4 radile u pogonu pumpanja, a svih 6 u režimu proizvodnje električne energije.

Faktori opterećenja pumpi i turbina za navedene instalirane snage vjetra od 1200 MW, 2400 MW i 3600 MW izračunati su prema izrazima (24) – (26), a dani su u tablici 3.

$$\text{Faktor opterećenja pumpi} : \frac{GNV}{P_{i,max} * 8760} \quad [-] \quad (24)$$

$$\text{Faktor opterećenja turbina} : \frac{GPE}{T_{i,max} * 8760} \quad [-] \quad (25)$$

$$\text{Ukupni faktor opterećenja} : \frac{GNV}{P_{i,max} * 8760} + \frac{GPE}{T_{i,max} * 8760} \quad [-] \quad (26)$$

Tablica 3. Faktori opterećenja pumpi i turbina

Instalirana snaga vjetroelektrana	Faktor opterećenja pumpe	faktor opterećenja turbine	ukupni faktor opterećenja
1200 MW	0,0389	0,0115	0,0503
2400 MW	0,0484	0,0263	0,0747
3600 MW	0,0918	0,0518	0,1436

6. PROIZVODNA CIJENA ELEKTRIČNE ENERGIJE IZ RHE [29] [30] [31]

Nakon provedenog dimenzioniranja i određivanja pohranjene, proizvedene i odbačene energije, treba se provesti i postupak određivanja proizvodne cijene električne energije iz reverzibilnih hidroelektrana. Postupak se sastoji od određivanja investicijskih troškova, troškova održavanja, energije koja je apsorbirana direktno u mrežu i ukupne proizvedene električne energije na godišnjoj razini.

Pretpostavke:

- koristi se samo snaga vjetra (prema prethodno pokazanim uvjetima) za pumpanje vode u spremnik
- nema nikakvih konvencionalnih izvora energije što pojednostavljuje proračun
- cijena izgradnje vjetroelektrana se ne uzima u sklopu proračuna
- navedene cijene su okvirne i izabrane iskustveno
- teren na kojemu se izgrađuje spremnik se mora izravnati, a ti troškovi se pridodaju troškovima izgradnje cjevovoda
- vrijednosti troškova zaokružene su radi jednostavnijeg proračuna na prvu veću vrijednost
- potrebne informacije o iznosu izravno apsorbirane energije vjetra u mrežu i godišnje proizvedene električne energije u hidroelektrani su dobivene u prethodnim točkama
- izrazi u formulama su uvršteni u odgovarajućim mjernim jedinicama, a obrađene su u Microsoft Excel programu

Proizvodna cijene se računa prema izrazu:

$$EPC_T = \frac{TIC_{WPS} * R + OMC_{WPS} + CE_C \pm BE_W}{E_T} \quad [\text{kn/kWh}] \quad (27)$$

Ukupni investicijski troškovi izgradnje reverzibilne hidroelektrane (TIC_{WPS}) računaju se prema izrazu koji uključuje cijenu pumpi, cijenu turbina, cijenu izgradnje spremnika, cijene izrađivanja i postavljanja cjevovoda, cijene spajanja na električnu mrežu, cijene sistema kontrole, cijene transporta opreme, troškova plaća radnika i cijene ostalih troškova:

$$TIC_{WPS} = C_{RT} + C_S + C_C + C_{GC} + C_{CS} + C_T + C_P + C_O \quad [€] \quad (28)$$

Anuitet R računa se prema izrazu u kojemu oznaka i predstavlja kamatnu stopu EIB-a[32]

$$R = \frac{i}{1 - (1+i)^{-N}} \quad [-] \quad (29)$$

Pogonski troškovi i troškovi održavanja računaju se prema izrazu:

$$OMV_{WPS} = 2\% * (C_{RT} + C_S + C_C) \quad [€] \quad (30)$$

Zbog pretpostavke da se koristi samo snaga vjetra za pumpanje vode u spremnik, trošak konvencionalne energije korištene za pumpanje ne postoji ($CE_C = 0$). Zajamčena otkupna cijena električne energije iz vjetroelektrana iznosi $p_w = 0,80$ kn/ kWh[33]. Koristeći zajamčenu cijenu iz vjetroelektrana i podatak o količini izravno apsorbirane energije iz istoimenih za pogon motora pumpe, dobije se trošak izravne apsorpcije vjetra(BE_w):

$$BE_w = p_w * E_{W,h \rightarrow A} \quad [€] \quad (31)$$

Ukupna proizvedena električna energija u razdoblju od godine dana (E_T) uzima se iz prethodno obrađenog poglavlja mogućnosti pohrane energije vjetra.

Tablica 4. Pregled investicijskih troškova izgradnje i vrijednosti potrebnih za proračun[34]

Simbol	Formula	1200 MW	2400 MW	3600 MW
C_{RT}	-	660000000 €	701000000 €	610000000 €
C_S	$420 * V^{0,7}$	33000000 €	33000000 €	33000000 €
C_C	$1,25 * (\sum_L(C_M + C_{IZOL} + C_{ISKOP})) + C_{TEREN}$	45000000 €	45000000 €	45000000 €
C_{GC}	$4\% * (C_{RT} + C_S + C_C)$	28000000 €	30000000 €	27000000 €
C_{CS}	$1,6\% * (C_{RT} + C_S + C_C)$	18000000 €	18000000 €	16000000 €
C_{TR}	$2,4\% * (C_{RT} + C_S + C_C)$	15000000 €	5000000 €	5000000 €
C_P	$30\% * (C_{RT} + C_S + C_C)$	213000000 €	225000000 €	200000000 €
C_O	$2\% * (C_{RT} + C_S + C_C)$	15000000 €	15000000 €	14000000 €
TIC_{WPS}	$C_{RT} + C_S + C_C + C_{GC} + C_{CS} + C_{TR} + C_O + C_P$	992000000 €	1050000000 €	930000000 €
OMC_{WPS}	$2\% * (C_{RT} + C_S + C_C)$	15000000 €	15000000 €	14000000 €
E_T	-	295660 MWh	671696 MWh	1307627 MWh
$E_{W,h \rightarrow A}$	-	2213983 MWh	4334220 MWh	4801381 MWh

Izvršavanjem proračuna proizvodna cijena za određenu instaliranu snagu vjetra za 3 moguća slučaja iznosi:

- 1) Slučaj kada je potrebno otkupiti proizvedenu energiju u vjetroelektranama koja se koristi za pogon motora pumpe za pohranu vode u gornju akumulaciju:

$$EPC_{T,1} = \frac{TIC_{WPS} * R + OMC_{WPS} + CE_C + BE_W}{E_T}$$

$$EPC_{T,1200 MW} = 10,81 \text{ kn/kWh}$$

$$EPC_{T,2400 MW} = 4,52 \text{ kn/kWh}$$

$$EPC_{T,3600 MW} = 2,17 \text{ kn/kWh}$$

- 2) Slučaj kada se trošak od izravno apsorbiranog vjetra u električnu mrežu zanemaruje jer je cijena energije iz vjetroelektrana jako niska (blizu 0 kn/kWh):

$$EPC_{T2} = \frac{TIC_{WPS} * R + OMC_{WPS} + CE_C + BE_W}{E_T}$$

$$EPC_{T,1200 MW} = 10,05 \text{ kn/kWh}$$

$$EPC_{T,2400 MW} = 3,87 \text{ kn/kWh}$$

$$EPC_{T,3600 MW} = 1,80 \text{ kn/kWh}$$

Cijena je pretvorena iz EUR u HRK prema tečaju HNB-a[35]. Usporedbe radi, zajamčena cijena koju propisuje HROTE[36] za hidroelektrane koje proizvode više od 15000 MWh godišnje je 0,57 do 0,70 kn. Dobivene vrijednosti proizvodne cijene električne energije u reverzibilnom postrojenju tj na reverzibilnim turbinama su previsoke i isplativost investicije je upitna. Važno je naglasiti da je postrojenje dimenzionirano i modelirano za pokrivanje cjelokupnog opterećenja EES ovisno o mogućnostima prihvata vjetra i da je zbog te pretpostavke tako velike nazivne snage i zahtjeva velike investicijske troškove. Uz to, pretpostavljene cijene su realno pretpostavljene uzimajući u obzir da gore navedena reverzibilna hidroelektrana od 3600 MW u Fengning-u[10] zahtjeva investiciju vrijednu \$1870000000, a uključuje i izgradnju donje akumulacije.

7. ZAKLJUČAK

Osnovna svrha rada bila je upoznavanje sa mogućnošću izgradnje reverzibilnih hidroelektrana koje iskorištavaju energiju za pohranu vode na višu razinu povećavajući potencijalnu energiju iste te korištenje pohranjene vode za proizvodnju električne energije kada je ona potrebna. Proučavao se matematički model pohrane i puštanja vode iz gornje akumulacije, prisutni gubici strujanja i efikasnost pohrane energije. Odabirom lokacije Jukić Gradina prikazanom metodologijom i algoritmima se prikazala mogućnost skladištenja energije u obliku vode u gornjem spremniku iskorištavajući viškove energije vjetra kada ih je bilo. Određenim uvjetima koji su varijabilni poput minimalne energije vjetra od 600 MWh i granice za određivanje vršnog opterećenja, dobile bi se različite vrijednosti godišnje pohranjene energije u akumulaciju i godišnje proizvedene energije na turbinama u reverzibilnoj hidroelektrani.

Dobivene su vrijednosti godišnje napumpane vode u rasponu od 364 do 1629 GWh za različite instaliranu snagu vjetroelektrana, dok godišnja proizvedena električna energija iznosi 296 do 1308 GWh, također u ovisnosti o instaliranoj snazi vjetroelektrana. Uz to, dobivene su različite vrijednosti odbačene energije vjetra koji variraju od 0 do 881 GWh što ukazuje na potencijalnu iskoristivost navedene odbačene energije na način da se poveća volumen pohrane gornje akumulacije pri nazivnoj snazi vjetroelektrane od 3600 MW. Ukupni faktori opterećenja kreću se od 5% do 14% što predstavlja jako malu iskoristivost pumpi i turbina za pumpanje vode u gornju akumulaciju, odnosno za proizvodnju električne energije. Uzrok tome relativno male potrebne snage za pumpanje, odnosno mala proizvedena električna energija u odnosu na maksimalne vrijednosti za instalirane snage vjetroelektrana. Primjerice, maksimalna snaga za pogon motora pumpe pri 1200 MW iznosi 1067 MW, dok kod 3600 MW instalirane snag vjetroelektrana imamo 2025 MW. U slučaju proizvodnje električne energije, zahtjev kod turbinskog režima rada pri 1200 MW instalirane snage vjetroelektrana je 2943 MW, dok je pri 3600 MW zahtjev 2882 MW što ukazuje na korištenje svih 6 raspoloživih reverzibilnih turbina u režimu proizvodnje električne energije.

Inicijalno je projekt vrlo dobro osmišljen jer se doskače problemu što boljeg iskorištavanja vjetroenergije s ciljem izravnavanja krivulja vršnih opterećenja i rasterećenja drugih izvora energije koji imaju visoke pogonske troškove i cijenu goriva. Omogućuje i veću penetraciju električne energije u mrežu dobivene iz vjetroelektrana jer omogućuje pohranu viška energije vjetra, a i proizvodnju električne energije kada vjetra nema puštanjem vode iz gornje akumulacije na turbine u cjevovodima.

Glavni nedostatak gradnje hidroelektrane ovakvog tipa je pronalazak idealne lokacije s čime investicijski troškovi mogu rasti ili padati, ovisno o čimbenicima poput izravnjanja terena i udaljenosti od donjeg spremnika, u ovom slučaju jezera Peruća. Također, pozornost treba obratiti i na veličinu gornje akumulacije koja omogućuje dodatno spremanje vode i smanjivanje odbačene energije vjetra, ali za sobom vuče i veće investicijske troškove o kojima ovisi isplativost projekta. Radi detaljnije analize isplativosti trebali bi se napraviti različiti scenariji sa varijabilnim odnosima za vršno opterećenje, različitim vrijednostima proizvedene i pohranjene energije i različitim cijenama proizvodnje energije na turbinama kako bi se pronašli najmanje mogući investicijski troškovi jer oni diktiraju i određuju mogućnost i isplativost izgradnje. Bitan nedostatak je i nepredvidljivost prirode vjetra o kojoj ovisi faktor opterećenja pumpi i turbina s kojima raste ili opada vrijeme povrata investicije.

Projekti poput ovih s kojima se postupno pokušavaju zamijeniti fosilna goriva su projekti od posebnog značaja, pogotovo za zemlju poput RH koja ima veliki vjetro potencijal i veliki hidropotencijal zbog brojnih otvorenih područja na udaru vjetra i brojnih vodenih površina, jezera i rijeka. Uz to, velika je vjerojatnost iskorištavanja sredstava Europske Unije i pomoć Europskog Instituta za energiju i transport u detaljnijem projektiranju i razradi ovakvog projekta koji bi uvelike popravio način proizvodnje električne energije u smislu korištenja "zelenih" tehnologija, popravio izgled i težinu pokrivanja opterećenja nametnuta potrošnjom korisnika te ispunio uvjete Europske Unije nametnute Direktivama za OIE.

Dodatna mogućnost u istraživanju ovog područja je i suradnja sa susjednim zemljama s ciljem izgradnje velike reverzibilne hidroelektrane na području RH koja bi bila "spremnik energije" naše regije, služeći za pohranu viškova energije vjetra u više zemalja. Naravno, pri tome treba projektirati i procijeniti opterećenje električne mreže, omogućiti transport energije i napraviti financijsku analizu isplativosti ovakvog projekta. Veliki nedostatak pri gradnji ovakvih postrojenja su i preveliki investicijski troškovi i nepostojanje feed-in tarifa budući da se spremaju višci energije vjetroelektrana čija se energija otkupljuje po većim tarifnim cijenama. Kao zadnja mogućnost nameće se i izgradnja vjetro parka u sklopu reverzibilne hidroelektrane što su napravile zemlje poput Japana i SAD.

8. LITERATURA

- [1] http://en.wikipedia.org/wiki/Pumped-storage_hydroelectricity, pristupljeno: 2015-01-31
- [2] https://s3.amazonaws.com/ese-prod/uploads/project/image_1/375/yecheon.jpg, pristupljeno: 2015-01-31
- [3] <http://powerplants.vattenfall.com/powerplant/goldisthal>, pristupljeno: 2015-01-31
- [4] http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_pumped-storage_hydroelectric_power_stations, pristupljeno: 2015-01-31
- [5] http://en.wikipedia.org/wiki/Bath_County_Pumped_Storage_Station, pristupljeno: 2015-02-01
- [6] http://en.wikipedia.org/wiki/Guangdong_Pumped_Storage_Power_Station, pristupljeno: 2015-02-01
- [7] http://en.wikipedia.org/wiki/Huizhou_Pumped_Storage_Power_Station, pristupljeno: 2015-02-01
- [8] http://en.wikipedia.org/wiki/Okutataragi_Pumped_Storage_Power_Station, pristupljeno: 2015-02-01
- [9] http://en.wikipedia.org/wiki/Ludington_Pumped_Storage_Power_Plant, pristupljeno: 2015-02-01
- [10] http://en.wikipedia.org/wiki/Fengning_Pumped_Storage_Power_Station, pristupljeno: 2015-02-01
- [11] http://en.wikipedia.org/wiki/Kannagawa_Hydropower_Plant, pristupljeno: 2015-02-01
- [12] http://en.wikipedia.org/wiki/Dniester_Pumped_Storage_Power_Station, pristupljeno: 2015-02-01
- [13] <https://www.consumersenergy.com/content.aspx?id=6985>, pristupljeno: 2015-02-01
- [14] European Commission. Pumped-hydro energy storage: potential for transformation from single dams. Luxembourg: Publications Office of the European Union; 2011 Joint Research Centre – European Commission. ISBN 978-92-79-23182-7 2011.
- [15] http://hr.wikipedia.org/wiki/Hidroelektrana_Peru%C4%87a, pristupljeno: 2015-02-23

- [16] European Commission. Pumped-hydro energy storage: potential for transformation from single dams. Luxembourg: Publications Office of the European Union; 2011 Joint Research Centre – European Commission. ISBN 978-92-79-23182-7 2011.
- [17] <https://www.google.com/earth/>, pristupljeno: 2015-02-07
- [18] <http://preglednik.arkod.hr/ARKOD-Web/>, pristupljeno: 2015-02-07
- [19] McKeogh, E. (2007). Meeting the Challenges of RE Generation Wind Energy and Pumped Storage. EirGrid Annual Customer Conference 2007
- [20] Caralis G, Zervos A. Analysis of the combined use of wind and pumped storage systems in autonomous Greek islands. IET Renew Power Gen 2007;1(1):49–60.
- [21] Caralis G, Zervos A. Analysis of the combined use of wind and pumped storage systems in autonomous Greek islands. IET Renew Power Gen 2007;1(1):49–60.
- [22] <https://www.entsoe.eu/db-query/consumption/mhlv-a-specific-country-for-a-specific-month>, pristupljeno: 2015-02-10
- [23] Kapsali M, Kaldellis JK. Combining hydro and variable wind power generation by means of pumped-storage under economically viable terms. Appl Energy 2010;87:3475–85.
- [24] Kapsali M, Kaldellis JK. Combining hydro and variable wind power generation by means of pumped-storage under economically viable terms. Appl Energy 2010;87:3475–85.
- [25] McKeogh, E. (2007). Meeting the Challenges of RE Generation Wind Energy and Pumped Storage. EirGrid Annual Customer Conference 2007
- [26] McKeogh, E. (2007). Meeting the Challenges of RE Generation Wind Energy and Pumped Storage. EirGrid Annual Customer Conference 2007
- [27] McKeogh, E. (2007). Meeting the Challenges of RE Generation Wind Energy and Pumped Storage. EirGrid Annual Customer Conference 2007
- [28] McKeogh, E. (2007). Meeting the Challenges of RE Generation Wind Energy and Pumped Storage. EirGrid Annual Customer Conference 2007
- [29] Caralis G, Zervos A. Analysis of the combined use of wind and pumped storage systems in autonomous Greek islands. IET Renew Power Gen 2007;1(1):49–60.
- [30] Krajačić G, Duić N, Tsikalakis A, Zoulias M, Caralis G, Panteri E, et al. Feed-in-tariffs for promotion of energy storage technologies. Energy Policy 2011;39:1410–25.
- [31] Krajačić G et al. Analysis of financial mechanisms in support to new pumped hydropower storage projects in Croatia. Appl Energy (2012), <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.07.007>
- [32] www.eib.org/attachments/generalreports/fr2013en.pdf

- [33] HROTE: Godišnji izvještaj o sustavu poticanja proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora energije i kogeneracije u Republici Hrvatskoj za 2013. godinu, Zagreb (ožujak 2013.)
- [34] Caralis G, Zervos A. Analysis of the combined use of wind and pumped storage systems in autonomous Greek islands. IET Renew Power Gen 2007;1(1):49–60.
- [35] <http://www.hnb.hr/tecajn/htecajn.htm> ; pristupljeno 2015-02-23
- [36] HROTE: Godišnji izvještaj o sustavu poticanja proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora energije i kogeneracije u Republici Hrvatskoj za 2013. godinu, Zagreb (ožujak 2013.)