



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAĐEVINSKI FAKULTET
UNIVERSITY OF ZAGREB
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Ivan Tomaš

REVERZIBILNE HIDROELEKTRANE

Završni rad

Zagreb, 2023.

SADRŽAJ

1	Uvod.....	3
2	Reverzibilne hidroelektrane.....	4
2.1	Općenito.....	4
2.2	Funkcionalni dijelovi RHE.....	4
2.3	Konstruktivski dijelovi RHE.....	6
2.3.1	Dijelovi gornjeg rezervoara.....	6
2.3.2	Konstrukcije u službi povezivanja rezervoara.....	10
3	Uklapanje RHE u okoliš.....	12
3.1	Karakteristike potencijalnih lokacija za izgradnju RHE.....	12
3.1.1	Preduvjeti lokacije za izgradnju RHE.....	12
3.1.2	Kriterij geološke strukture.....	13
3.2	Utjecaji na okoliš.....	15
3.2.1	Negativne posljedice izgradnja hidroelektrana U RH.....	15
4	Primjeri RHE u sklopu obnovljivih izvora energije.....	16
4.1	RHE i vjetroparkovi.....	16
4.2	RHE i solarne elektrane.....	18
5	Postojeće RHE i potencijali u RH.....	20
5.1	Postojeće RHE u Hrvatskoj.....	20
5.2	Planirani projekti u RH.....	22
5.3	RHE Vrdovo.....	24
5.3.1	Tehnički opis RHE Vrdovo.....	24
5.3.2	Tehnički opis bazena.....	24
6	Zaključak.....	26
7	Sažetak.....	27
8	Literatura.....	28

POPIS SLIKA

Slika 1. Presjek strojarnice RHE u Irskoj (Turlough Hill).....	5
Slika 2. Pony Motor hydraulic pump	5
Slika 3. Shematski prikaz presjeka RHE	6
Slika 4. Brana i akumulacijsko jezero HE Peruća.....	7
Slika 5. Rezervoar (RHE Turlough Hill, Irska)	7
Slika 6. Nasuta brana (Nasuta brana Peruća).....	8
Slika 7. Betonska brana (Betonska brana HE Lešće)	9
Slika 8. Presjek nasipa s glinenim ekranom.....	9
Slika 9. Presjek vodne komore.....	10
Slika 10. Vizualni prikaz potrebnog odnosa vertikalne i horizontalne udaljenosti gornjeg u donjeg rezervoara.	13
Slika 11. Akumulacijsko jezero Štikada s pritocima.....	14
Slika 12. Akumulacijsko jezero Obsenica s pritokom Obsenica i kanalom Obsenica-Ričica	14
Slika 13. RHE pogonjena snagom vjetra u okolici Gaildorfa	16
Slika 14. Izgradnja vjetroturbine i rezervoara.	17
Slika 15. Dovršena vjetroturbina i puni rezervoar	17
Slika 16. Hidro/solana elektrana Sirindhorn	18
Slika 17. CHE Lepenica.....	20
Slika 18. Tlačna cijev RHE Velebit.....	22
Slika 19. Panoramski pogled na RHE Velebit sa zasunske komore (vrh tlačnog cjevovoda) i pogled na zaledeno umjetno jezero Razovac u veljači 2012.....	22
Slika 20. Sunčana elektrana Cres	23
Slika 21. RHE Vrdovo	25
Slika 22. RHE Vrdovo	25

POPIS TABLICA

Tablica 1. Najveće plutajuće solarne elektrane u svijetu	19
Tablica 2. Planirane vjetroelektrane u HR.....	23

1 Uvod

Predmet ovoga rada su reverzibilne hidroelektrane u pogledu skladištenja energije iz obnovljivih izvora energije. U ovome radu analizirati će se tehnička izvedivost, ekonomičnost i ekološki utjecaj reverzibilnih elektrana te njihov potencijal u zelenoj tranziciji sa neobnovljivih na obnovljive izvore energije. Dodatna pažnja će se posvetiti radu i funkcioniranju reverzibilnih hidroelektrana te postojećim objektima u Republici Hrvatskoj. Analiza tehničke izvedivosti, ekonomičnosti i ekološkog utjecaja reverzibilnih elektrana odraditi će se pomoću analize postojećih objekata, onih u izgradnji te planiranih projekata u Republici Hrvatskoj i ostatku svijeta.

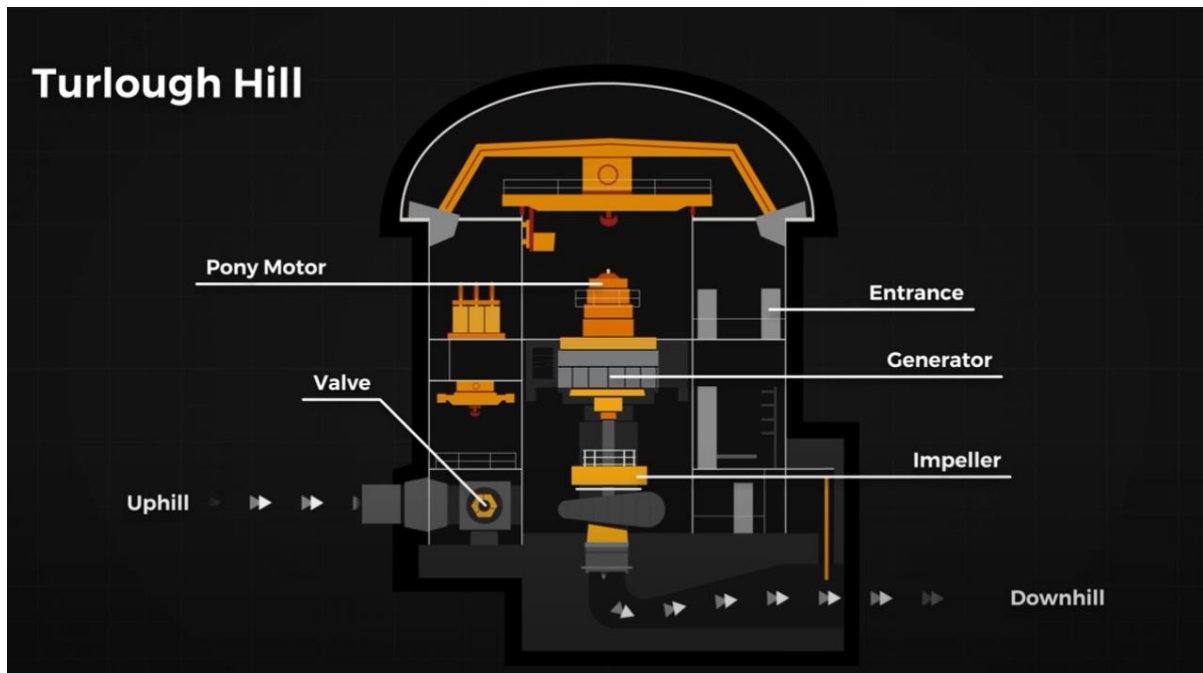
2 Reverzibilne hidroelektrane

2.1 Općenito

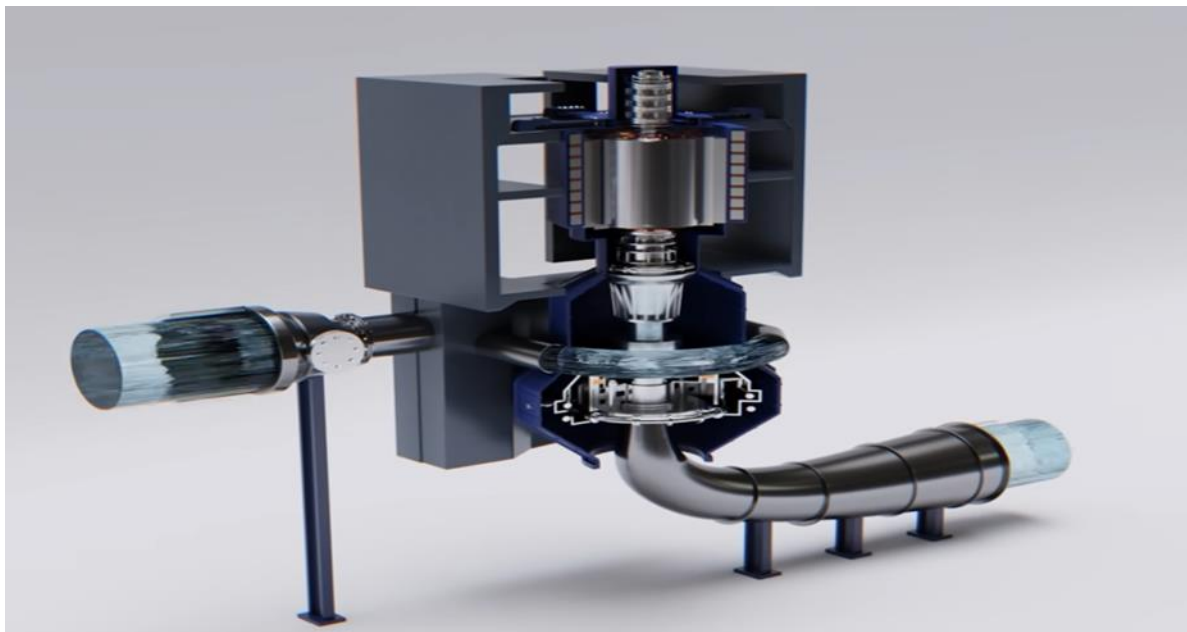
Unatrag nekoliko desetljeća čovječanstvo je postalo svjesno razmjera kojim utječe na svijet oko sebe te da neodrživim iskorištavanjem resursa smanjuje kvalitetu života mnogim ljudima. Čovječanstvo je odlučilo uhvatiti se ukoštac s problemima kako bi pronašlo načine da zadrži komfore koje joj je napredak tehnologije omogućio, ali da i omogući da buduće generacije uživaju blagodati ove planete. Glavni problem koji se nameće je kako se riješiti fosilnih goriva kao glavnih izvora energije te problem skladištenja energije. Vjetroelektranama, solarnim panelima, hidroelektranama...pronađena su raznolika rješenja na pitanje zamjene fosilnih goriva, ali iskorak na polju skladištenja energije je od ključne važnosti kako bi se tranzicija na obnovljive izvore provela u cijelosti. Nažalost velikog napretka u razvoju baterija koje su u stanju skladištiti dovoljne količine električne energije potrebne za komforan život ljudi gradovima nije bilo. Najpopularnije litij-ionske baterije imaju mnogo mana (pozamašan ali nedovoljan broj ciklusa punjenja i pražnjenja, rijetkost litija te potreba uništavanja netaknute prirode da bi se zadovoljila potreba tržišta...) zbog toga se počela pojavljivati zainteresiranost za malo stariju metodu čuvanja energije pomoću vode. Reverzibilne hidroelektrane omogućuju skladištenje električne energije kada je ima više nego je potrebno te njeno korištenje kada je nedostaje (u ostatku teksta reverzibilne hidroelektrane će se oslovljavati s RHE). Reverzibilne hidroelektrane se sastoji od dvije akumulacije ili rezervoara na različitim nadmorskim visinama te padom vode iz više akumulacije u nižu pomoću kinetičke energije generira se električna energija (naknadno objašnjeno detaljnije). Prva reverzibilna hidroelektrana je izgrađena 1907. godine u Švicarskoj u Engeweiheru te su se počele graditi širom svijeta kao glavni način skladištenja energije. U ovome radu objasniti će se što su reverzibilne hidroelektrane te njihovo usklađivanje s obnovljivim izvorima energije koji kao nepresušni izvor predstavljaju krucijalnu globalnu važnost ne samo za gospodarsko već i ekološko pitanje u vremenima koja slijede.

2.2 Funkcionalni dijelovi RHE

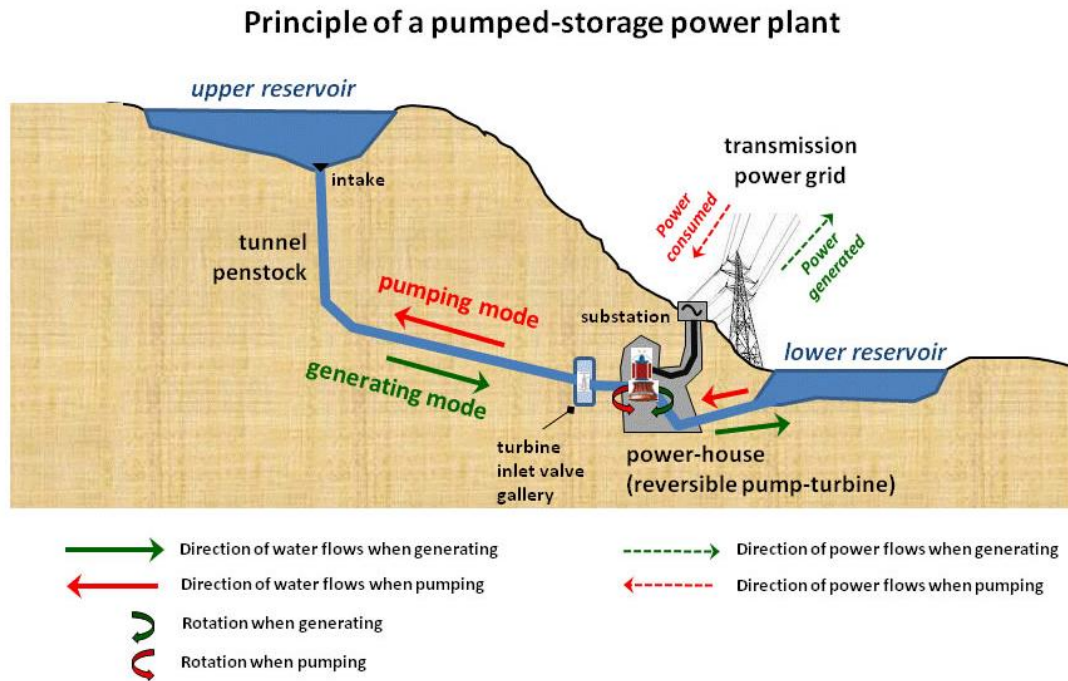
Za razliku od običnih hidroelektrana kod RHE protok vode se odvija u dva smjera što rezultira različitim konfiguracijama osnovnih dijelova hidroelektrane posebice u strojarnici. Krenuvši od gornje akumulacije voda kroz ulaznu građevinu prodire u dovodni tunel koji vodu odvodi do zasunske komore u kojoj se nalaze zatvarači pomoću kojih se regulira protok vode kroz dovodni tunel. Ukoliko je protok vode omogućen nakon što prođe voda započinje naglo mijenjati nadmorsku visinu te pomoću tlačnog cjevovoda ponire prema račvi tlačnog cjevovoda te nakon toga ulazi u strojarnicu. Nakon ulaska u strojarnicu voda dolazi do turbine (obično kao Francis turbina) koja pomoću generatora proizvodi električnu energiju. Prolaskom kroz turbinu voda odvodnim tunelom odlazi dalje do izlazno-ulazne građevine te naposljetku u donji bazen. Najveća razlika običnih hidroelektrana od reverzibilnih leži u tome što su strojarnice RHE opremljene pumpama za podizanje vode iz nižeg u viši rezervoar. Jedna od pumpa koje se koriste u te svrhe je *Pony Motor hydraulic pump* (Slika 8.) koja je ugrađena u RHE Turlough Hill te koja za vrijeme pumpanja vode uzbrdo povlači električnu energiju iz mreže i koristi ju za pokretanje turbine u drugom smjeru.



Slika 1. Presjek strojarnice RHE u Irskoj (Turlough Hill). Pony motor-vrsta hidrauličke pumpe, Valve-ventil, Generator-genertor, Impeller-pokretač, Entrance-ulaz, Uphill-uzbrdo(cjevovod prema gornjem rezervoaru), Downhill-nizbrdo(cjevovod prema donjem rezervoaru)



Slika 2. Pony Motor hidraulična pumpa



Slika 3. Shematski prikaz presjeka RHE. Upper reservoir-gornji rezervoar ili gornja akumulacija, Lower reservoir-donji rezervoar ili donja akumulacija, Tunnel penstock- tunelski cjevovod, Power-house- prostorija s generatorom, Turbine inlet valve gallery- galerija ulaznog ventila turbine, Pumping mode- način rada pumpanja, Generating mode- način rada generiranja

2.3 Konstrukcijski dijelovi RHE

Fokus ovoga poglavlja će biti na dijelovima RHE čije izvedbe pripadaju građevinarskoj struci te su od ključne važnosti za izgradnju kompleksne građevine kao što je RHE. Turbine, generatori, motori, zapornice i zatvarači spadaju primarno u domenu strojarske struke stoga se neće detaljno promatrati u ovom radu.

2.3.1 Dijelovi gornjeg rezervoara

Promatrajući RHE od više točke nadmorske visine prema nižoj prvo nailazimo na gornje akumulacijsko jezero ili gornji rezervoar. Akumulacija (Slika 10.) je građevina koja se koristi za pohranjivanje voda u vrijeme kada je ima više od potreba, a mogu se koristiti u vrijeme nedostatka vode. Akumulacije se formiraju u dolinama vodotoka ili u prikladnom prostoru izgradnjom brane. Za razliku od njih rezervoari (Slika 11.) su u cijelosti umjetne građevine (također se koriste za pohranjivanje voda). Ako na odabranoj lokaciji postoji vodotok zadovoljavajućih karakteristika te se odluči izgraditi akumulacija u svrhu opskrbljivanja RHE vodom potrebno je izgraditi branu. Koja brana će se izgraditi prvenstveno ovisi o topografiji (oblik pregradnog profila), geologiji i uvjetima temeljenja, raspoloživom materijalu, veličini preljeva brane i njegovoj lokaciji te o potresima. Prema materijalu ih dijelimo na nasute i betonske brane pri čemu nasute brane (Slika 12.) imaju prednosti pogledu minimalnih zahtjeva kod temeljenja i prilagodljivost skoro svim vrstama terena te mogućnost korištenja raznovrsnog i heterogenog materijala za nasip, dok betonske brane (Slika 13.) imaju veću izdržljivost na prelijevanje i procjeđivanje te se koriste manje količine materijala.



Slika 4. Brana i akumulacijsko jezero HE Peruća.



Slika 5. Rezervoar (RHE Turlough Hill, Irska).



Slika 6. Nasuta brana (Nasuta brana Peruća) HEP grupa.



Slika 7. Betonska brana (Betonska brana HE Lešće).

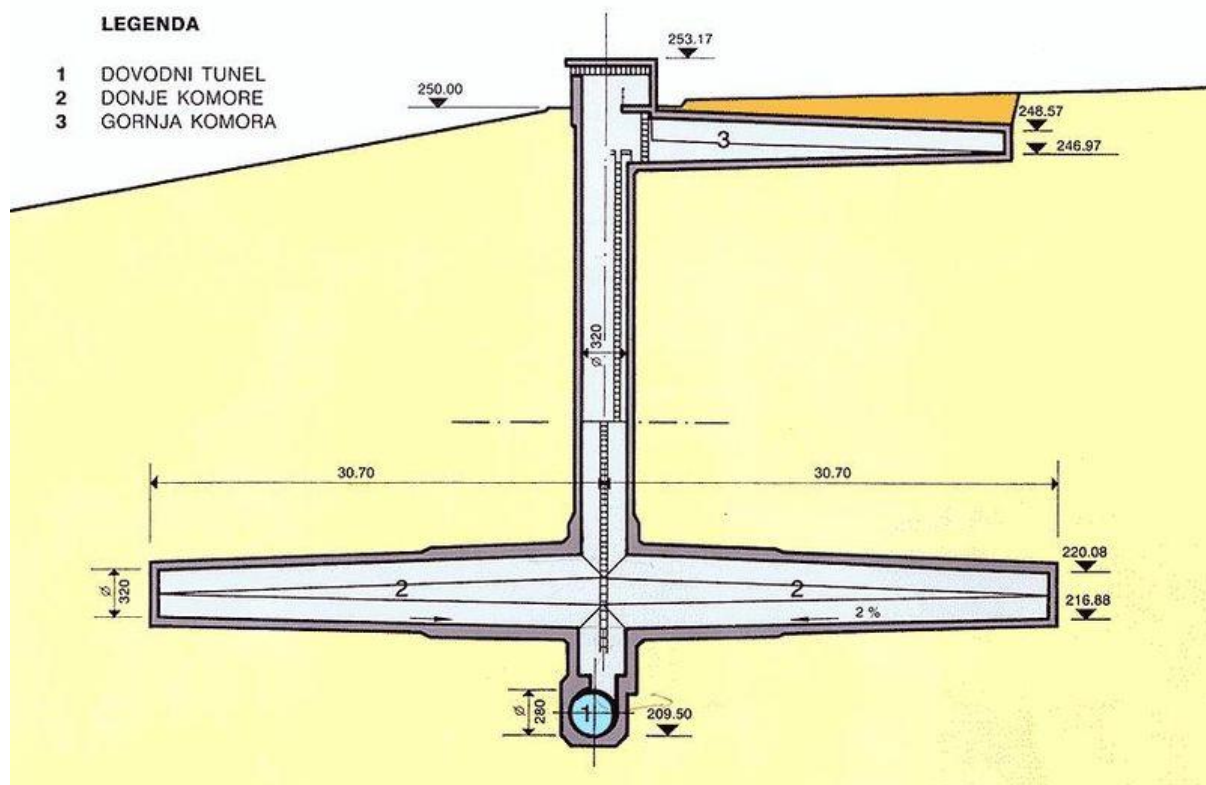
U situaciji u kojoj nema prirodnog vodotoka nema ni potrebe za građenjem brane te se gadi rezervoar koji je u pogledu izgradnje RHE masivan te se umjesto cilindričnih metalnih konstrukcija grade se obuhvatni nasipi koji zadržavaju vodu na zato predviđenom mjestu. Nasipi mogu biti građeni od razolikih materijala te se uglavnom grade od najpristupačnijeg materijala zbog uštede troškova transporta. Ukoliko materijal od kojega je građen nasip nije adekvatan za zadržavanje vode postoje mogućnosti dodavanja slojeva drugih vrsta materijala i/ili izvođenja konstrukcija u tijelu nasipa kao što su nepropusne jezgre, ekrani i drenaže.



Slika 8. Presjek nasipa s glinenim ekranom.

2.3.2 Konstrukcije u službi povezivanja rezervoara

U prethodnom podpoglavlju objašnjeno je što su to akumulacije i rezervoari, ali kako bi građevina kao što je RHE bila cjelovita potrebna je konstrukcija koja će omogućiti protok vode iz jedne akumulacije u drugu i to u oba smjera. Kako bi se omogućio protok vode između akumulacija grade se tuneli i cjevovodi u svrhu transporta vode. Promatrajući trasu cjevovoda od gornje akumulacije prema donjoj prva konstrukcija na koju se nailazi je ulazna građevina dovodnog tunela s zapornicom preko koje voda iz akumulacije ulazi u dovodni tunel. Zbog količine i brzine vode u RHE dovodni tuneli se izvode kao tlačni tuneli koji omogućuju znatne oscilacije vodnih nivoa u akumulaciji te tako omogućuju izraženo reguliranje vodotoka te dozvoljavaju visinske lomove trase. Tlačni tuneli su u pravilu kružnog profila, koji je i hidraulički najpovoljniji, s manjim modifikacijama radi prilagođavanja tehnologiji izvedbe u smislu omogućavanja kretanja tunelom. Kada je voda dovedena na željenu poziciju s najpovoljnijim nagibom prije nego počne ponirati niz tlačni cjevovod potrebno je izgraditi vodnu komoru ili vodostan. Vodna komora ili vodostan (Slika 15.) se gradi u slučaju da je dovodni tunel dugačak (može biti i 10 do 20 km), te pri pokretanju hidroelektrane se vodna masa ne može u kratkom roku (10-20 sekundi) pokrenuti i dobiti brzinu da bi se na vodnim turbinama stvorila dovoljna snaga za proizvodnju električne energije. Da bi se umanjilo neželjeno djelovanje tromosti vode, kao i da bi se izbjegli utjecaji koji nastaju zbog njene stišljivosti (vodni udar), u blizini turbine se grade vodne komore. Osnovna zadaća vodne komore je da se pri ulasku turbine u pogon osigura dio vode prije nego što on poteče u dovoljnoj količini kroz dovodni tunel, te da prihvati dio vode koja se kreće dovodnim tunelom pri zaustavljanju turbina. Na taj način se izbjegava nagla promjena brzine u dovodnom tunelu i pojava vodnog udara.



Slika 9. Presjek vodne komore.

Osiguravši konstrukciju od naglih promjena brzina i pojave vodnog udara iduća konstrukcija u koju voda sada može sigurno ući je tlačni cjevovod koji vodu dovodi do strojarne i u konačnici turbine. Tlačni cjevovodi su linijski sustavi provodnika isključivo pod tlakom koji se izvode nadzemno, podzemno, podvodno ili u građevinama. U pogledu RHE tlačni cjevovodi se najčešće izvode čelični, nadzemni i većih promjera zbog jednostavnije i jeftinije izvedbe te dostupnosti (kontrola). U tlačnim cjevovodima tečenje je pod tlakom i u redovitom radu uspostavlja se stacionarno tečenje, te se računaju hidraulički gubitci izrazima:

$$\sum \Delta H = \sum \Delta H_{\text{lok}} + \sum \Delta H_{\text{lin}}$$

Gdje je $\sum \Delta H$ {m} suma svih hidrauličkih gubitaka, $\sum \Delta H_{\text{lok}}$ {m} suma svih lokalnih hidrauličkih gubitaka (otpor oblika), $\sum \Delta H_{\text{lin}}$ {m} suma svih linijskih hidrauličkih gubitaka (otpor trenja). Čelični nadzemni cjevovodi izvode se od čeličnih bešavnih cijevi, ili zavarivanjem čeličnih limova kod većih profila. Tvornički se izrađuju cilindri koji se poprečnim varenjem spajaju na gradilištu. Kod promjera većih od 3 metra, zbog uvjeta transporta, u tvornici se izvode u polucilindrima i na gradilištu se zavare uzdužno i poprečno. Nadzemni čelični cjevovodi se izvode iznad tla, fiksiraju se čvrstim točkama (sidrenim blokovima) i oslanjaju se na sedla. Na svakom lomu (vertikalni i horizontalni) postavlja se sidreni blok, a između je cijev u pravcu. Udaljenost sidrenih blokova ne prelazi 150 - 200 metara. Zadatak sidrišnih blokova je prenijeti na tlo sve sile koje se javljaju uzduž cjevovoda. Cijev se između blokova oslanja se na sedla (pomični ležajevi) postavljeni na 6 – 15 metara razmaka. Sedla imaju zadatak omogućiti nesmetano uzdužno pomicanje cjevovoda i prenijeti na tlo primarno normalnu silu. Projektiranje čeličnih cjevovoda se provodi na osnovi Tehničkih propisa za čelične konstrukcije. Konstrukcija se definira kao cjelina (globalno, cjevovod), a zatim se provodi kontrola elemenata konstrukcije (presjeci, spojevi, blokovi, ležajevi). Preliminarno se potrebna debljina stjenka (δ) može odrediti prema kotlovskoj formuli:

$$\delta = pd / 2\sigma_{\text{dop}} = pr / \sigma_{\text{dop}}$$

(p- unutrašnji pritisak vode, d/r-dijametar/radijus, σ_{dop} – dopuštena naprezanja).

Kritični tlak se može procijeniti iz izraza :

$$p_{kr} = (\delta/d)^3 2E_{\check{c}} / F_s,$$

gdje je F_s faktor sigurnosti. Ako debljina stijenke ne zadovoljava ovaj uvjet, cijev se ojačavaju prednaprežanjem ili bandažama (prstenovi) te se dijametar i debljina stijenke po potrebi mijenjaju duž trase.

3 Uklapanje RHE u okoliš

3.1 Karakteristike potencijalnih lokacija za izgradnju RHE

3.1.1 Preduvjeti lokacije za izgradnju RHE

Prije razmatranja geografskih lokacija koje bi bile idealne za izgradnju RHE treba prvo objasniti nekoliko koncepata koji omogućuju odrediti parametre koji su ključni za isplativost skupe investicije kao što je RHE. Uzeti ćemo 1 kubni metar vode čiju energiju možemo povećati ako povećamo njenu visinu. Računamo povećanje energije koristeći jednadžbu za potencijalnu energiju.

Potencijalna energija

masa x gravitacija x visina

Potencijalna energija (oznaka E_p) je energija koju posjeduje neko tijelo zbog svojega položaja u prostoru ili zbog dobivenih elastičnih deformacija (na primjer rastegnuta ili stisnuta opruga, savijeni štap i slično). Prelaskom tijela u novi položaj ili oslobađanjem njegovih deformacija, potencijalna energija može prijeći u kinetičku energiju tijela ili izvršiti određeni rad. Sada se vratimo se našem primjeru s jednim kubnim metrom vode. Masa jednog kubnog metra vode je 1,000 kg što nam uz akceleraciju gravitacije (9.81m/s^2) pokazuje da sa svakim metrom visine dodajemo 9,810 J energije tj. 2.275 Wh.

Potencijalna energija

Masa (m) = 1,000 kg

Akceleracija (g) = 9.81 m/s²

Visina (h) = 1 m

.....

Potencijalna energija (Ep) = 9,810 J

= 2.275 Wh

U navedenom primjeru vidi se da to nije puno, 2.275 Wh bi pogonilo žarulju od 100 Wh svega 98.1 sekundu te tu energiju ne možemo konvertirati bez gubitaka. Uz 80% efikasnosti 98.1 sekundi bi bilo bliže 78.5 sekundi. Ali ako bi taj jedan kubni metar vode stavili na visinu od 286 m taj jedan kubni metar bi istu tu žarulju pogonio 22,451 sekundu odnosno 6.2 h.

Potencijalna energija

Masa (m) = 1,000 kg

Akceleracija (g) = 9.81 m/s²

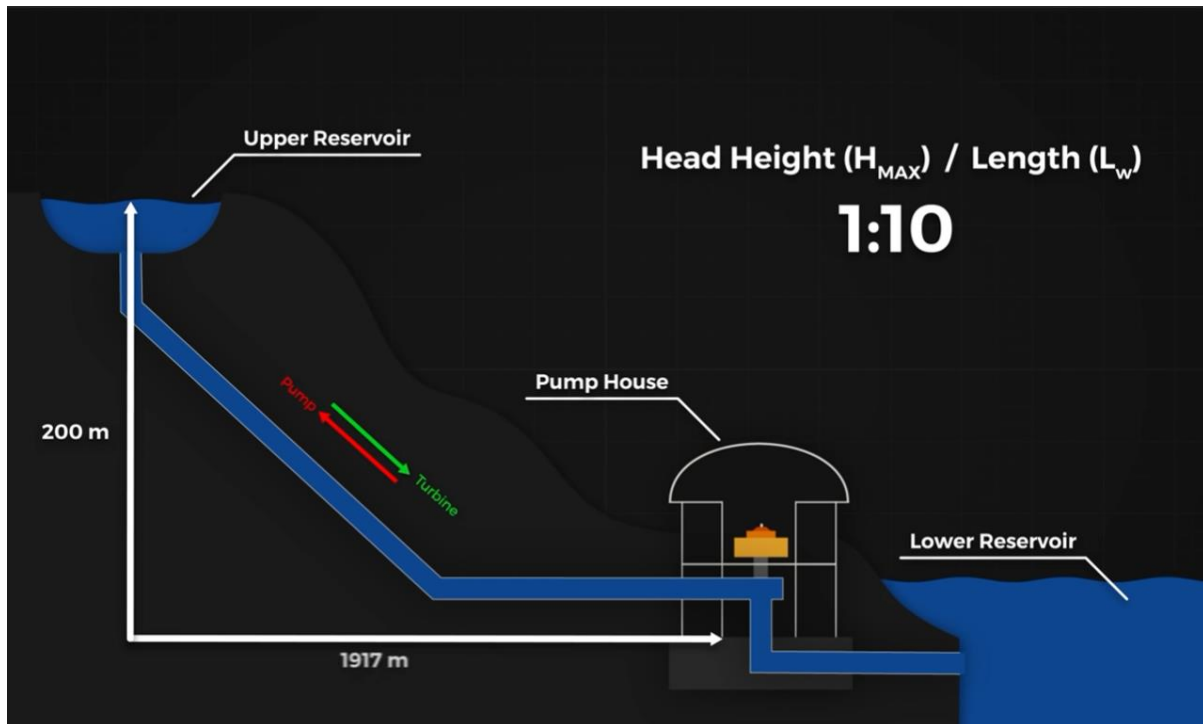
Visina (h) = 286 m

.....

Potencijalna energija (Ep) = 2,805,660 J x 0.80

= 623.48 Wh

Na ovome jednostavnom primjeru prikazana je ključna stvar potrebna za izgradnju efikasne i isplative RHE, a to je razlika u nadmorskoj visini između dvije akumulacije ili rezervoara. Kako bi se iskoristila razlika u nadmorskoj visini u što većem opsegu treba uzeti u obzir i horizontalnu udaljenost dvije akumulacije jer prevelika udaljenost u horizontalnom pogledu rezultira većim energetske gubitcima uslijed trenja i viskoznosti fluida u cijevima te većim troškovima izvođenja radova na RHE. Uobičajena praksa je da omjer visine i duljine ne smije prelaziti odnos 1:10 jer sve nakon toga postaje ekonomski neisplativo.



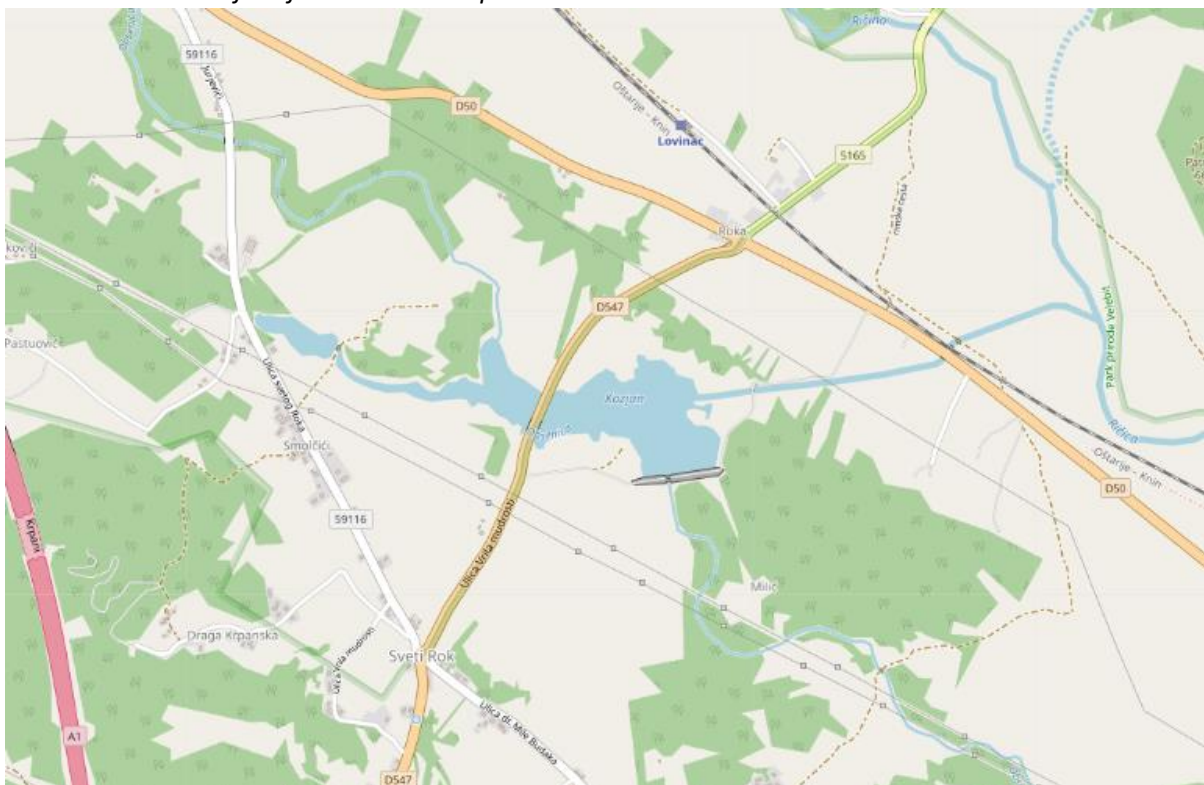
Slika 10. Vizualni prikaz potrebnog odnosa vertikalne i horizontalne udaljenosti gornjeg u donjeg rezervoara.

3.1.2 Kriterij geološke strukture

Ako je zadovoljen kriterij potrebne razlike u nadmorskoj visini kreće se u drugi krug eliminacije potencijalni lokacija RHE. Jedan od bitnih uvjeta je smanjenje gubitaka vode u akumulacijama ili rezervoarima posebice gornjoj akumulaciji ili rezervoaru. Gubitak na koji se teško utječe predstavlja gubitak vode isparavanjem, ali onaj na koji se može utjecati je gubitak vode procjeđivanjem u tlo. Kako bi se izbjegla skupa izvedba nepropusnih slojeva potrebna je Geološka podloga. Geološku podlogu čine geološki terenski istražni radovi kao što su rekognosciranje terena, površinska ispitivanja terena, istražne jame, ispitivanje površine tla geofonima, akustičko skeniranje podzemne vode...Kako bi se pojednostavio proces određivanja geografske lokacije idealno bi bilo pronaći mjesto na kojem postoji prirodni vodotok ili voda stajaćica. Lokacije na kojima postoje prirodne vode stajaćice i prirodni vodotoci su poželjne jer nam zadržavanje vode na tlu (voda ne ponire u krš) ukazuje na dostanu nepropusnost okolnog tla ili stijena. Primjer iskorištenosti takve lokacije bi bila RHE Velebit točnije njena dva gornja akumulacijska jezera Obsenica (Slika 6.) i Štikada (Obsenica je nastala građenjem brane na istoimenoj rijeci dok jezero Štikada (Slika 5.) akumulira vode rijeka Obsenice, Otučce i Ričice).



Slika 11. Akumulacijsko jezero Štikada s pritocima.



Slika 12. Akumulacijsko jezero Obsenica s pritokom Obsenica i kanalom Obsenica-Ričica HPSkarta

3.2 Utjecaji na okoliš

Unatoč golemim pozitivnim utjecajima hidroelektrana na smanjenje emisija stakleničkih plinova ne moguće je zanemariti negativne utjecaje na okoliš posebice na lokalnoj razini. Gradnjom RHE točnije izvedbom brana zadržava se velika količina vode na mjestima gdje se tako nešto nije događalo nikada prije te se javljaju razni problemi primarno uništavanje prirodnih staništa životinja i raseljavanje stanovništva. Od presudne je važnosti napraviti kvalitetne studije o utjecajima brana tj. hidroelektrana svih vrsta pa tako i RHE kako bi se izbjegla ili umanjila nepovratna šteta po ljude i okoliš. U ostatku ovoga podpoglavlja navoditi će se negativne posljedice prvenstveno običnih hidroelektrana zbog čestih konstrukcijski i izvedbenih sličnosti s RHE.

3.2.1 Negativne posljedice izgradnja hidroelektrana U RH

U Republici Hrvatskoj postoji nekoliko primjera hidroelektrana koje su imale velike posljedice po zajednice u blizini hidroelektrana te živi i neživi svijet u rijeci i njenoj neposrednoj okolini. Najpoznatija i medijski najeksponiranija zbog svoga utjecaja na prirodu je hidroelektrana Lešće čija je gradnja započeta u rujnu 2005. godine. Budući da je HE Lešće pribranskog tipa izgradnjom brane stvoreno je akumulacijsko jezero koje potopilo kanjon rijeke Dobre uzvodno od brane te izazvalo njegovo brže erodiranje. Uz razaranje prirodne ljepote javlja se problem remećenja prirodnih oscilacija u vodotoku te nastajanje velikih vodnih valova koji za posljedicu imaju potapanja korisnih površina nizvodno. Negativna posljedica koja još nije u potpunosti potvrđena je smanjenje temperature vode rijeke Dobre te u konačnici i rijeke Mrežnice u koju se rijeka Dobra ulijeva. Najveća šteta uzrokovana nepromišljenim projektom gradnje HE Lešće je povreda povjerenja stanovništva prema institucijama koje su zadužene za izgradnju hidroelektrana. Primjer protivljenja lokalnog stanovništva izgradnji hidroelektrane koja je imala puno potencijala je izbacivanja HE Ombla iz prostornog plana grada Dubrovnika. Ukoliko se to povjerenje ne zadobije nazad izgradnja hidroelektrana u RH će biti drastično usporena ili čak zaustavljena u potpunosti što bi onemogućilo daljnje odmicanje od fosilnih goriva te približavanje energetskej neovisnosti i održivom razvoju.

4 Primjeri RHE u sklopu obnovljivih izvora energije

4.1 RHE i vjetroparkovi

Korištenje RHE za skladištenje energije nije novi koncept, viškovi energije proizvedeni u termoelektranama se skladište u akumulacijama već desetljećima, ali skladištenje energije iz obnovljivih izvora kao što je vjetar je tek u povojima. Prvi takav projekt u svijetu započeo je u Njemačkoj u okolini grada Gaildorfa u čijoj se blizini nalazi rijeka Kocher pomoću čije vode je stvoreno akumulacijsko jezero koje služi kao donji rezervoar RHE. Izvor električne energije za postrojenje nalazi se na obroncima planine istočno od grada Gaildorfa u pogledu četiri vjetroturbine od kojih svaka ima kapacitet od 3,4 MW te one proizvode 42 GWh električne energije godišnje. Posebnost ovoga projekta u usporedbi s ostalim RHE ne leži samo u činjenici da je to prva RHE pogonjena obnovljivom energijom nego da ne postoji klasična izvedba jednoga velikog gornjeg rezervoara već četiri manja ispod tijela svake vjetroturbine. Ova konstrukcija od četiri vjetroturbine s pratećim rezervoarima te donjom akumulacijom u stanju je skladištiti do 57 MWh.



Slika 13. RHE pogonjena snagom vjetra u okolini Gaildorfa.



Slika 14. Izgradnja vjetroturbine i rezervoara.



Slika 15. Dovršena vjetroturbina i puni rezervoar.

3.2. RHE i solarne elektrane

Kao i postrojenja koja kombiniraju energiju vjetra i mogućnost vode da tu istu energiju čuva, solarne elektrane koje pogone RHE su još u povojima. Trenutno u svijetu ne postoji niti jedna RHE u koju se skladišti električna energija dobivena iz obnovljivih izvora, ali se eksperimentira s plutajućim solarnim elektranama koje se nalaze na akumulacijskim jezerima hidroelektrana. Ovaj tip hidroelektrane čuva vodu u akumulaciji tako što turbine ne proizvode ili proizvode manje električne energije tokom dana jer potrebnu energiju za strujnu mrežu proizvode solarni paneli dok tokom noći kada solarna energija nije dostupna voda se ispušta iz akumulacije te se proizvodi električna energija. Prva elektrana ovoga tipa realizirana je na Tajlandu 2021. godine instalacijom 144 417 solarnih panela na 121 hektara akumulacijskog jezera brane Sirindhorn na rijeci Lam Dom Noi. Solarne panele imaju kapacitet od 45 MW, a hidroelektrana kapacitet od 36 MW (službena stranica Simensa).



Slika 16. Hidro/solana elektrana Sirindhorn.

<https://press.siemens.com/global/en/pressrelease/egat-deploys-siemens-software-solutions-worlds-largest-hydro-floating-solar-hybrid>

Projekti nadogradnja akumulacija hidroelektrana i rezervoara vode izvode se širom svijeta tako da su prisutne u Singapuru, Indiji, Kini te Sjedinjenim Američkim Državama.

PV power station ↕	Location ↕	Country ↕	Nominal Power ^[22] (MW _p) ▾	Notes ↕
Dezhou Dingzhuang		China	320	+100 MW windpower ^{[21][23]}
Three Gorges	Huainan City, Anhui	China	150	[23]
Ramagundam	Peddapalli, Telangana	India	100	
Tata Power Solar	Kayamkulam, Kerala	India	100	
CECEP		China	70	[23]
Tengeh		Singapore	60	[23][24][25]
Sirindhorn Dam		Thailand	9	+36 MW hydropower ^[26]
	Sayreville, New Jersey	USA	4.4	[27]

Tablica 1. Najveće plutajuće solarne elektrane u svijetu.

5 Postojeće RHE i potencijali u RH

5.1 Postojeće RHE u Hrvatskoj

Republika Hrvatska ne zaostaje za ostatkom svijeta s RHE te one nisu novi koncept u gospodarenju električnom energijom. U Hrvatskoj postoji dvije hidroelektrane koje funkcioniraju pomoću reverzibilnih strojeva/crpki a to su CHE Lepenica (Slika 1.) i RHE Velebit pri čemu je CHE Lepenica starija (puštena u pogon 1922.godine), a RHE Velebit veća (Prosječna godišnja proizvodnja:430 GWh). CHE Lepenica pribransko je postrojenje koje koristi bruto padod oko 18m stvoren izgradnjom nasute brane. U stojarnici je smješten jedan reverzibilni stroj crpka/turbina s vertikalnom osovinom i zakretnim lopaticama, čime se unutar datih napora i neto padova postižu protoci u većem opsegu. CHE Lepenica je povezana s mrežom 35kV preko kabelskog voda 35kV i tona rasklopno postrojenje 35kV CHE Fužine. Srednja godišnja proivodnja CHE Lepenica iznosi 2,73GWh.



Slika 17. CHE Lepenica.

Reverzibilna hidroelektrana Velebit ili RHE Velebit građena je od 1978. do 1985. godine, a u redovnoj je proizvodnji od 1984. godine. Reverzibilna hidroelektrana Velebit je koštala astronomskih 1,25 milijardi njemačkih maraka, što bi u današnje vrijeme bilo više od 1534 milijuna eura. Gornje umjetno jezero se zove Štikada te se nalazi iza Velebita na Gračačkoj visoravni. U to jezero se ulijevaju sve okolne vode, koje su s tim jezerom povezane kanalom (rijeka Ričica), ili podzemnim tunelom dugim 2 825 metara (rijeka Otuča). Voda iz jezera Štikade se u turbinskom radu spušta dolje i koristi za proizvodnju električne energije, a u crpnom radu se ta ista voda pumpa u to gornje jezero. Prosječni srednji godišnji dotok u to jezero je $11,94 \text{ m}^3/\text{s}$. Hidroelektrana je puštena u pogon 1984. te manje/više nije radila za vrijeme Domovinskog rata, tj. radila je ispod minimalne snage pa se nakon rata morala obnoviti. Ukupna instalirana snaga hidroelektrane je 276 MW (instalirana snaga vodnih turbina), dok je u crpnom režimu snaga 240 MW (instalirana snaga crpki). RHE Velebit je posebna po tome što je najveća reverzibilna hidroelektrana u Hrvatskoj (RHE Lepenica i ima snagu 1,14 MW/-1,25 MW). Reverzibilna hidroelektrana je posebna vrsta hidroelektrane koja, osim što proizvodi električnu

energiju iz vode, kao i svaka druga hidroelektrana, tu istu vodu može pumpati u doba kada je to najisplativije, (najjeftinije), što je uglavnom noću. RHE Velebit je postrojenje koje se sastoji od gornjeg umjetnog jezera Štikade, s kojih koristi vodu za rad i u koje pumpa vodu kad radi kao crpka, tlačnog dovodnog cjevovoda i strojnarnice s ostalim objektima, te donjeg umjetnog jezera Razovac. RHE Velebit se nalazi na rijeci Zrmanji (Zadarska županija), 10 kilometara uzvodno od Obrovca. Za proizvodnju električne energije koristi vodne tokove na Gračačkom polju i to: Opsenice, Ričice, Otuče i potoka Krivka. U crpnom pogonu RHE Velebit uz vodu navedenih rječica koristi i vode rijeke Zrmanje. U tom slučaju, koristeći noćni višak energije, crpi vodu iz donjeg umjetnog jezera Razovac u gornje umjetnog jezera Štikada, da bi se ponovno ta ista voda koristila za proizvodnju električne energije.



Slika 18. Tlačna cijev RHE Velebit.



Slika 19. Panoramski pogled na RHE Velebit sa zasunske komore (vrh tlačnog cjevovoda) i pogled na zaledeno umjetno jezero Razovac u veljači 2012.

5.2 Planirani projekti u RH

Za razliku od mnogih država svijeta Republika Hrvatska posjeduje veliku raznolikost u pogledu obnovljivih izvora energije na svome relativno malome teritoriju te joj ta posebnost omogućuje da jednoga dana dobiva svu potrebnu električnu energiju iz obnovljivih izvora. Republika Hrvatska je već postigla mnogo u pogledu iskorištavanja energije vjetra, sunca i vode što je moguće vidjeti u podatku da u Hrvatskoj postoji dvadeset i pet vjetroelektrana, dvadeset i sedam hidroelektrana te čak tri tisuće osamsto dvadeset i jedna fotonaponskih elektrana spojeno na distribucijsku mrežu HEP-ODS do 18. siječnja 2022. godine. Obnovljivi izvori energije čine trideset i pet posto izvora električne energije u RH, a kako bi se taj postotak povećao predviđeni su mnogobrojni projekti izgradnje novih te

nadograđivanja postojećih objekata. Planira se izgradnja osam novih vjetroelektrana čija će ukupna snaga biti preko sedamsto megawata.

Naziv projekta	Nositelj projekta	Električna snaga
VE Karin	LUMEN SOLIS d.o.o.	30 MW
VE Pliš Jelenje	HEP - Proizvodnja d.o.o.	28 MW
VE Bradarić Kosa	HEP - Proizvodnja d.o.o.	58 MW
VE Kozjak	NOVA ENERGIJA d.o.o.	
VE Oton	NOVA ENERGIJA d.o.o.	18 MW
VE Brda Umovi	3A RETAIL CONSULTING d.o.o.	127,5 MW
VE Vrataruša II	SELAN d.o.o.	24 MW
VE Lički Medvejed	Green Trust	425 MW

Tablica 2. Planirane vjetroelektrane u HR.

Uz vjetroelektrane planirane su razne integrirane i neintegrirane sunčane elektrane kao što su sunčana elektrana Črnkovci i sunčana elektrana Cres čija će priključna snaga biti šest i pol megawata, a očekivana proizvodnja od oko 8,5 milijuna kWh električne energije godišnje odgovara potrošnji oko 2.500 kućanstava.



Slika 20. Sunčana elektrana Cres.

5.3 RHE Vrdovo

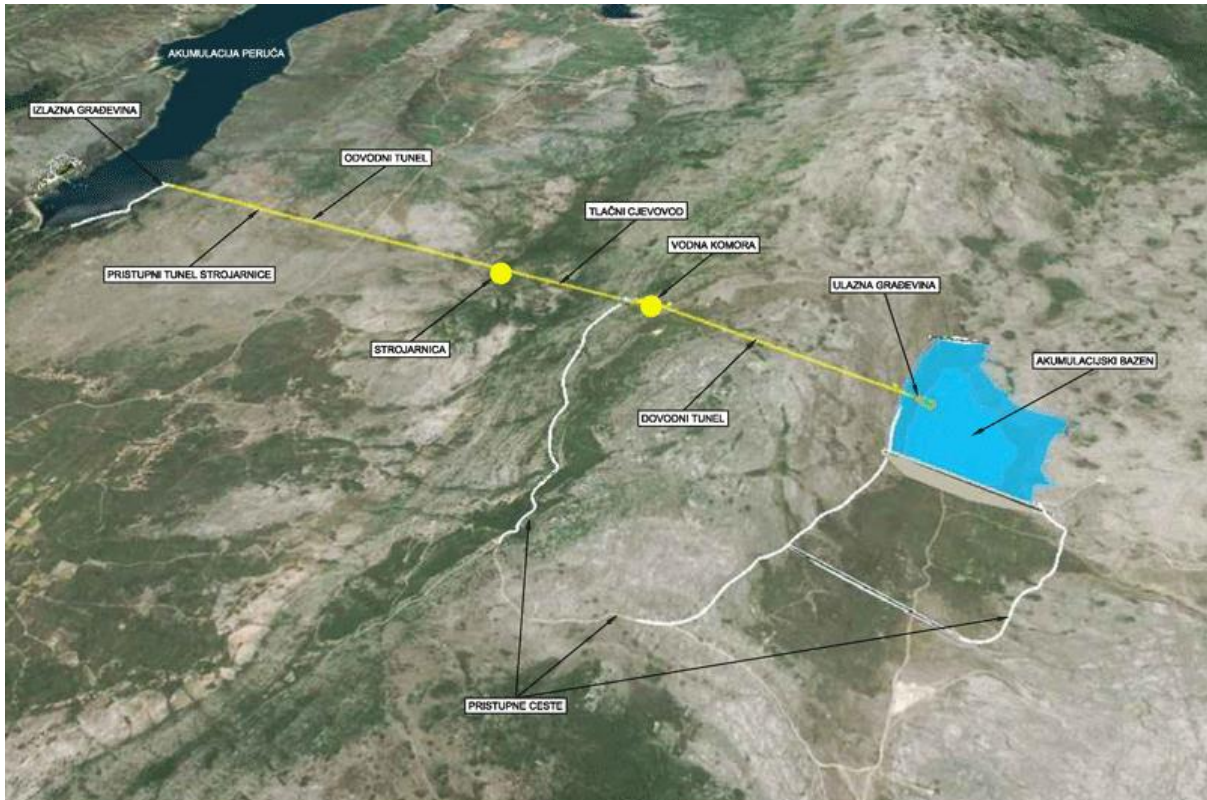
Rastom iskorištavanja obnovljivih izvora energije te razlike energije dobivene tokom dana odnosno godine povećava se potreba za skladištenjem iste posebice ljeti kada postoji surplus električne energije dobivene iz snage vjetra i sunca. Kako bi se rješio problem skladištenja energije u planu je izgradnja RHE Vrdovo. RHE Vrdovo je reverzibilna hidroelektrana koja se planira izgraditi na potezu između sjeverne strane akumulacije HE Peruća i prirodne udoline Ravno Vrdovo. Posebnu vrijednost ovoj lokaciji, zbog čega je ona jedna od najpovoljnijih u Hrvatskoj, daju postojeće akumulacijskog jezera Peruća i relativno mala udaljenost do udoline Ravno Vrdovo (Splitsko-dalmatinska županija), blizina elektroenergetskog sustava i veza na elektroenergetski sustav EU, kao i mala udaljenost velikog broja izgrađenih i planiranih vjetro i solarnih elektrana.

5.3.1 Tehnički opis RHE Vrdovo

U strojarnicu će biti ugrađena dva reverzibilna agregata s francis turbinom/pumpom i sinkronim generatorom/motorom snage 270/245 MW. Agregati mogu raditi kao pumpe u smjeru pumpanja vode iz akumulacijskog jezera Hidroelektrane (HE) Peruća u gornji bazen Ravno Vrdovo (pumpni režim rada, te kao generatori kada se vodu iz gornjeg bazena na Ravnom Vrdovu pušta kroz turbinu (generatorski režim rada). Pumpanje vode u pumpnom režimu rada i ispuštanje vode u akumulacijsko jezero Peruća u generatorskom režimu rada vrši se kroz donji dovodno odvodni podzemni tunel promjera 7m koji završava s osi tunela na koti 326,25 m.n.m. u jezeru HE Peruća. Dovodno-odvodni tunel 200 m prije ulaza u jezero proširuje se u obliku lijevka i ulazi u jezero s minimalnim otvorom površine 250m² kako bi brzina vode iz jezera u odvodno-dovodni tunel bila unutar dopuštenih granica, tj. ispod 0,5 m/s.

5.3.2 Tehnički opis bazena

Donji bazen predstavlja postojeće akumulacijsko jezero Peruća dok je za gornji bazen predviđeno zapadno područje udoline Ravno Vrdovo na Dinari. Ukupna površina gornjeg bazena bit će 86 ha, odnosno 153 ha za alternativno rješenje, maksimalna zapremina 21.600.000 m³, odnosno 24.000.000 m³ za alternativno rješenje. Ove su zapremine dovoljne za tjedni ciklus rada. Na bazi dnevnog ciklusa rada u bazen se pumpa cca 3.628.800 m³, a u turbinskom režimu rada potroši 3.600.000 m³. Nivo radne kote gornjeg bazena za RHE Vrdovo je od 925 m.n.m. do 955 m.n.m. za osnovno rješenje te 920 m.n.m. do 945 m.n.m. za alternativno rješenje. Dotok u gornji bazen, samo od oborina i dijela slivnih voda s sjeverne strane Ravnog Vrdova. Procijenjena količina dotoka na osnovu prosječnih godišnjih količina oborina na području Bitelića na godišnjoj razini je približno 4.000.000 m³.



Slika 21. RHE Vrdovo.



Slika 22. RHE Vrdovo.

6 Zaključak

U ovome radu nastojano je objasniti što su to reverzibilne hidroelektrane kako funkcioniraju, koje su njihove prednosti a koje mane te postoji li za njih mjesto u današnjem svijetu u kojem briga o okolišu i našem utjecaju na njega nikada nije bila veća. Reverzibilne hidroelektrane su neizbježan alat zelene revolucije te bez njih potpuna tranzicija s fosilnih na obnovljive izvore energije nije moguća. Pomoću reverzibilnih hidroelektrana moguće je skladištiti velike količine viška energije dobivene iz snage sunca i vjetra te ih koristiti kasnije tokom noći ili nevjetrovitih dana. Istina je da se građenjem hidroelektrana uništavaju svakojaka staništa flore i faune te u nekim slučajevima raseljavaju ljudi stvaranjem akumulacija potrebnih za rad hidroelektrana, ali smatram da je to prihvatljiva cijena za platiti jer alternativna rješenja kao što su elektrane na plin, ugljen, naftne derivate sigurno i nepovratno zagađuju živi i neživi svijet oko nas. U današnjem svijetu ima mjesta za reverzibilne hidroelektrane te su nam one jedina realna solucija u skladištenju većih količina električne energije te se nadam da će ih u skorijoj budućnosti biti izrađeno još kako u Hrvatskoj tako i u ostatku svijeta.

7 Sažetak

Reverzibilne hidroelektrane su trenutno najveća mjesta skladištenja energije u svijetu. Zbog sve većeg obujma korištenja energije iz obnovljivih izvora, javlja se potreba integriranja instalacija kao što su vjetroelektrane i solarne elektrane u infrastrukturu potrebnu za skladištenje energije. Za realizaciju novih projekata potrebno je kombinirano znanje o reverzibilnim hidroelektranama te o vjetroelektranama i solarnim elektranama. Zbog toga tema ovoga rada je što su to reverzibilne hidroelektrane općenito, postojeće i buduće reverzibilne elektrane te eksperimentalni projekti kombiniranih elektrana energije vode, vjetra i sunca.

Ključne riječi: reverzibilne hidroelektrane, vjetroelektrane, solarne elektrane, obnovljiva energija, skladištenje energije

Reversible hydropower plants are currently the largest energy storage sites in the world. Due to the ever-increasing volume of use of energy from renewable sources, there is a need to integrate installations such as wind and solar power plants into the infrastructure needed for energy storage. The realization of new projects requires combined knowledge of reversible hydroelectric power plants, wind power plants and solar power plants. Therefore, the subject of this work is reversible hydropower plants in general, existing and future reversible power plants, and experimental projects of combined water, wind and solar power plants.

Keywords: reversible hydropower plants, wind power plants, solar power plants, renewable energy, energy storage

8 Literatura

Članci

- 1) <https://www.hep.hr/proizvodnja/hidroelektre-1528/1528>
- 2) https://www.youtube.com/watch?v=JSgd-QhLHRI&t=369s&ab_channel=RealEngineering
- 3) <https://repozitorij.gfv.unizg.hr/islandora/object/gfv%3A347/datastream/PDF/view>
- 4) https://hr.wikipedia.org/wiki/Vodna_komora
- 5) <https://www.mbrenewables.com/en/pilot-project/>
- 6) <https://press.siemens.com/global/en/pressrelease/egat-deploys-siemens-software-solutions-worlds-largest-hydro-floating-solar-hybrid>
- 7) https://en.wikipedia.org/wiki/Floating_solar
- 8) https://hr.wikipedia.org/wiki/Vjetroelektrane_u_Hrvatskoj
- 9) <https://www.hep.hr/proizvodnja/obnovljivi-izvori-energije/1395>
- 10) <https://www.hep.hr/projekti/obnovljivi-izvori-energije/3406>
- 11) https://mingor.gov.hr/UserDocImages/ARHIVA%20DOKUMENATA/ARHIVA%20---%20PUO/2016/sazetak_studije_za_javni_uvid_2.pdf
- 12) <http://www.vis-viva-energija.com/rhe-vrdovo/>

Tablice

- 1) https://en.wikipedia.org/wiki/Floating_solar 21.8.2022.
- 2) https://hr.wikipedia.org/wiki/Vjetroelektrane_u_Hrvatskoj 21.8.2022.

Slike

- 1) https://www.youtube.com/watch?v=JSqd-QhLHRI&t=369s&ab_channel=RealEngineering 14.8.2022.
- 2) https://www.youtube.com/watch?v=JSqd-QhLHRI&t=369s&ab_channel=RealEngineering 14.8.2022.
- 3) https://hr.wikipedia.org/wiki/Hidroelektrana_Peru%C4%87a 15.8.2022.
- 4) https://hr.wikipedia.org/wiki/Hidroelektrana_Peru%C4%87a 15.8.2022.
- 5) <https://www.irishtimes.com/news/ireland/irish-news/esb-offers-free-tours-of-turlough-hill-hydro-station-1.1850809> 15.8.2022.
- 6) https://www.google.com/search?q=brana+peru%C4%8Da&rlz=1C1CHBF_enHR838HR838&sxsr=ALiCzsbG4q7ONSeNU1R6F6GwdQbDzMf6lQ:1660559779563&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwjvqee08j5AhVd8rsIHR8nABwQ_AUoAXoECAIQAw&biw=1920&bih=937&dpr=1#imgsrc=NOE51sRKP6730M 15.8.2022.
- 7) <https://www.hep.hr/proizvodnja/hidroelektrane-1528/pp-he-zapad/he-lesce/1543> 15.8.2022.
- 8) <https://repozitorij.gfv.unizg.hr/islandora/object/gfv%3A347/datastream/PDF/view> 15.8.2022.
- 9) https://hr.wikipedia.org/wiki/Vodna_komora 15.8.2022.
- 10) https://upload.wikimedia.org/wikipedia/hr/f/fa/RHE_Velebit_11.jpg 13.8.2022.
- 11) <https://www.hps.hr/karta/> 14.8.2022.
- 12) <https://www.hps.hr/karta/> 14.8.2022.
- 13) https://w3.windmesse.de/uploads/notice/preview/31545/scada_20190517.JPG 20.8.2022.
- 14) <https://www.mbrenewables.com/wp-content/uploads/max-boeql-impressionen-pq008.jpg> 20.8.2022.
- 15) <https://www.mbrenewables.com/wp-content/uploads/max-boeql-impressionen-pq005.jpg> 20.8.2022.
- 16) <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:7e62fe42-7c4e-4ce2-82ea-141881bb9279/width:1024/quality:HIGH/7e62fe42-7c4e-4ce2-82ea-141881bb9279-high.webp> 21.8.2022.
- 17) <https://www.hep.hr/proizvodnja/hidroelektrane-1528/pp-he-zapad/rhe-lepenica/1538> 13.8.2022.
- 18) https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a6/Cijev_hidrocentrale_2009.jpg 13.8.2022
- 19) https://upload.wikimedia.org/wikipedia/hr/f/fa/RHE_Velebit_11.jpg 13.8.2022.
- 20) <https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fnovac.jutarnji.hr%2Fnovac%2Faktuarno%2Fhep-na-cresu-gradi-najvecu-solarnu-elektranu-na-zemljistu-koje-su-dali-franjevci-7534509&psig=AOvVaw3Jyq29rAouUcTs1BE2I3dW&ust=1680193132566000&source=image&cd=vfe&ved=0CBAQjRxqFwoTCIDq3qbFqf4CFQAAAAAdAAAAABAI> 1.4.2023.
- 21) http://www.vis-viva-energija.com/wp-content/uploads/2015/10/3d-Prikaz-Model_web.png 1.4.2023.
- 22) https://www.nacional.hr/wp-content/uploads/2016/06/Vis_Viva_KKPE_Peru_a_1.jpg 1.4.2023.