

# Analiza korištenja energetskeg potencijala potoka Curak

---

Lisac, Adrian

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:943606>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-12**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski stručni studij strojarstva

Završni rad

**ANALIZA KORIŠTENJA ENERGETSKOG POTENCIJALA  
POTOKA CURAK**

Rijeka, srpanj 2023.

Adrian Lisac

9996003753

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski stručni studij strojarstva

Završni rad

**ANALIZA KORIŠTENJA ENERGETSKOG POTENCIJALA  
POTOKA CURAK**

Mentor: prof. dr. sc. Zoran Čarija, dipl. ing.

Rijeka, srpanj 2023.

Adrian Lisac

9996003753

# IZJAVA

Prema „Pravilniku o završnom radu, završnom ispitu i završetku preddiplomskih sveučilišnih studija“ Tehničkog fakulteta u Rijeci izjavljujem da sam samostalno, uz konzultacije s mentorom, izradio završni rad „Analiza korištenja energetskeg potencijala potoka Curak“.

Rijeka, srpanj 2023.

---

Adrian Lisac

## ZAHVALA

Zahvaljujem se svome mentoru izv. prof. dr. sc. Zoranu Čariji, dipl. ing. na pomoći, uvidu i savjetima tijekom izrade završnog rada.

Zahvaljujem se v. asist. dr. sc. Ivani Lučin na pomoći i savjetima tijekom izrade završnog rada.

Zahvalio bih se i radnicima Josipu Kauzlariću, Dariju Škaronu, Damiru Liscu, Branimiru Branjušiću, Gordanu Jurkoviću i Franku Petroviću u sklopu HEP proizvodnje, HE Zeleni Vir i HE Curak na informacijama i mogućnosti posjete postrojenja.

# SADRŽAJ

1. UVOD .....	7
2. VODNA ENERGIJA .....	8
3. HIDROELEKTRANE .....	10
3.1. Vrste hidroelektrana .....	11
3.2. Dijelovi hidroelektrane .....	13
3.2.1. Vodne brane ili pregrade .....	14
3.2.2. Zahvat .....	16
3.2.3. Dovod vode .....	16
3.2.4. Vodna komora .....	17
3.2.5. Zasunska komora .....	18
3.2.6. Tlačni cjevovod .....	18
3.2.7. Strojarnica .....	18
3.2.8. Odvod vode .....	19
4. HIDROENERGETSKI SUSTAV ZELENI VIR .....	20
4.1. Vodna pregrada sa zahvatom .....	22
4.2. Dovodni tunel .....	23
4.3. Vodna komora .....	25
4.4. Tlačni cjevovod .....	26
4.5. Strojarnica .....	27
4.6. Odvodni tunel .....	29
5. HIDROELKTRANA CURAK .....	30
5.1. Dovodni tunel .....	31
5.2. Strojarnica .....	32
5.3. Odvodni kanal .....	33
6. PRORAČUN NOVE HIDROELEKTRANE .....	34
6.1. Računanje gubitaka cjevovoda u sustavu .....	34
6.1.1. Segment I .....	36
6.1.2. Segment II .....	37
6.1.3. Segment III .....	38
6.1.4. Segment IV .....	39
6.1.5. Ukupni gubitci cjevovoda u sustavu .....	40
6.2. Proračun bruto i neto pada .....	41

6.2.1.	Bruto pad .....	41
6.2.2.	Neto pad .....	43
6.3.	Traženje promjera turbine preko bezdimenzijskih značajki .....	44
6.3.1.	Karakteristike turbostrojeva .....	44
6.3.2.	Specifična brzina vrtnje .....	44
6.3.3.	Bezdimenzijska specifična brzina vrtnje .....	45
6.3.4.	Cordierov dijagram .....	46
6.3.5.	Računanje promjera turbostroja .....	48
6.3.6.	Površine promjera turbostroja .....	49
6.3.7.	Brzine strujanja kroz turbostroj .....	49
6.3.8.	Izračun snaga i usporedba .....	50
6.3.9.	Rezultati .....	52
7.	ZAKLJUČAK .....	54
8.	SAŽETAK .....	55
9.	ABSTRACT .....	56
	LITERATURA .....	57
	POPIS SLIKA .....	59
	POPIS TABLICA .....	61
	PRILOZI .....	62

## 1. UVOD

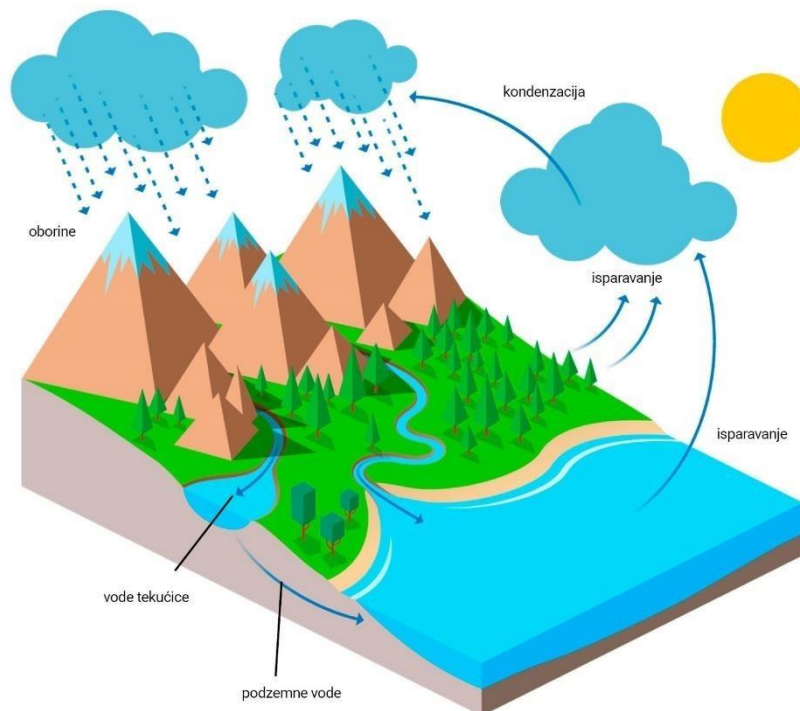
Zadatak završnog rada bio je opisati postrojenja HE Zeleni Vir i HE Curak te izvršiti analitičku usporedbu energetskeg potencijala potoka Curak pri različitim protocima neke nove hidroelektrane koja bi zamijenila HE Zeleni Vir i HE Curak. Ta nova elektrana imala bi protok 50% veći od instaliranog protoka od  $4.4 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $6.6 \text{ m}^3/\text{s}$ ) za koju smo morali izračunati promjere ulaznog i izlaznog cjevovoda 2 turbostroja koja bi bila izvedena u istoj. Za početak trebalo je opisati postrojenja HE Zeleni Vir i HE Curak i njihove komponente nakon čega je trebalo izračunati gubitke unutar dovodnih, tlačnih i odvodnih tunela i cjevovoda za dva različita protoka.

Nakon dobivenih gubitaka trebalo je pronaći bruto i neto padove kako bismo uz pomoć broja okretaja u minuti turbina odredili bezdimenzijske značajke. Na temelju bezdimenzijskih značajki preko Cordierovog dijagrama trebalo je odrediti promjer cjevovoda koji ćemo instalirati u novu hidroelektranu. Na kraju je trebalo odrediti koji tip turbine ćemo koristiti te izmodelirati presjek turbine i strojarnice i odrediti njihove dimenzije. Na kraju, dobivenu snagu nove hidroelektrane trebalo je usporediti s postojećima kako bismo usporedili isplativost izvedbe iste. Svi modeli izrađeni su u programu AutoCAD.



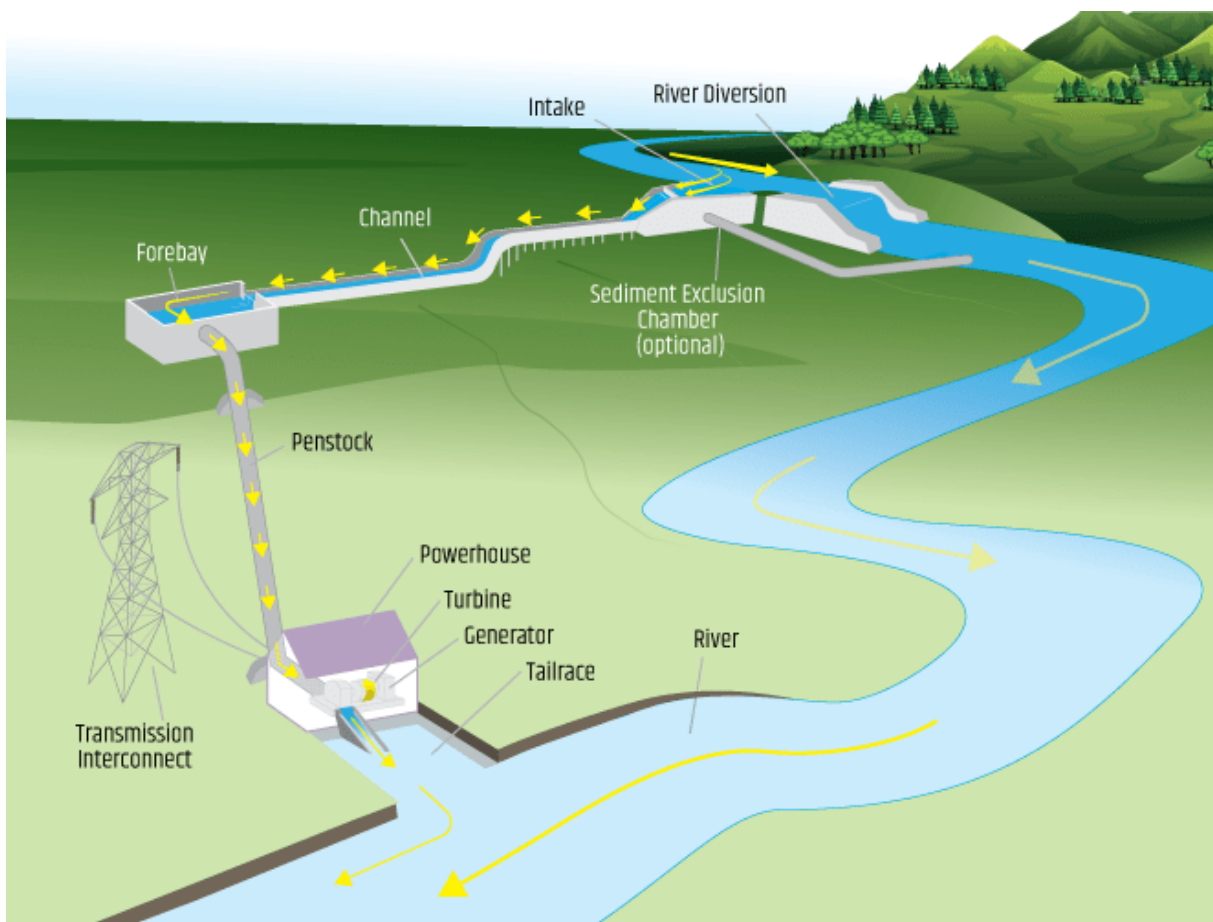
## 2. VODNA ENERGIJA

U prirodi početni oblik vodne energije, koja se koristi za pogon vodnih turbina, energija je položaja. Tu energiju voda poprima na visoko položenim terenima dospijevajući do njih prirodnim putem kroz oborine ili umjetnim putem preko crpki. To omogućuje da promjenom položaja vode, s više razine na nižu, ona ima mogućnost obavljanja nekog efektivnog rada. Druge oblike vodne energije u prirodi možemo dobiti korištenjem energije plima i oseka, energije morskih valova te korištenjem depresijskih pustinjskih područja u blizini mora i oceana. Raspoloživa vodna energija u prirodi, osim energije plime i oseke, zapravo je energija sunca koja je kroz isparavanje, kondenzaciju i oborine transformirana u vodnu energiju (ciklus kruženja vode).



Slika 2. 1. Ciklus kruženja vode u prirodi [11]

Strujanjem vode kroz korito voda mijenja položaj s više razine na nižu. Ukoliko je velika razlika u visini između izvora i ušća rijeke, ona će na svom putu svu svoju raspoloživu tj. efektivnu energiju pretvoriti u gubitke korita. Drugim riječima, riječno korito će zbog svoje dužine i hrapavosti „potrošiti“ svu vodnu energiju. Takav gubitak energije možemo izbjeći tako da vodu usmjerimo „hidraulički povoljnijim“ smjerom kao što su dovodni tuneli, kanali i cjevovodi kod kojih bi imali značajno manje gubitke nego kao kod korita. Na taj način dio energije koji smo sačuvali u konačnici možemo pretvoriti u električnu energiju.



Slika 2. 2. Preusmjeravanje vodnog toka [13]

### 3. HIDROELEKTRANE

Hidroelektrane su postrojenja koja energiju vode (vodotoka i jezera) pretvaraju u električnu energiju. U hidroelektranama se kinetička energija vodotoka i jezera preko vodnih turbina pretvara u mehaničku energiju vodotoka i jezera koja služi za pogon električnih generatora. Sustav hidroelektrane sastoji se od svih objekata koji služe za sakupljanje, dovođenje i odvođenje, pretvorbu i razvod proizvedene električne energije.

Osnovni dijelovi hidroelektrana su:

1. Uređaj za uspor vode (akumulacijsko jezero, vodni bazen i sl.)
2. Vodne brane ili pregrade
3. Zahvat
4. Dovod vode
5. Vodna komora
6. Zasunska komora
7. Tlačni cjevovod
8. Račva
9. Strojarnica
10. Odvod vode

Hidroelektrane ne moraju imati sve navedene dijelove. Neke hidroelektrane su jednostavnije, a neke složenije, ovisno o načinu korištenja vodnog potencijala.

### 3.1. Vrste hidroelektrana

Prema načinu korištenja vode razlikujemo:

- Protočne hidroelektrane – iskorištavaju vodu onako kako dotječe. Nemaju svoju akumulaciju ili imaju akumulaciju koja se pri nominalnoj snazi može isprazniti za manje od dva sata. Kod protočnih elektrana kinetička energija vode direktno se koristi za pokretanje turbina. Ovakve vrste hidroelektrana su najjednostavnije za izradu, nemaju veliki utjecaj na okolinu, ali ovise o trenutnom dotoku vode.
- Akumulacijske hidroelektrane –sadrže akumulacijsko jezero u kojem se voda sadrži za potrebe energetskog postrojenja. Prema poziciji strojarnice u odnosu na branu dijelimo ih na pribranske i derivacijske. Pribranski tip hidroelektrane dobivamo izgradnjom vodne brane u koritu rijeke. Ako se strojarnica nalazi u sustavu brane i preuzima dio tlaka vode, onda govorimo o riječnoj hidroelektrani. Derivacijske hidroelektrane grade se u brdskim predjelima ili u ravnici kada samom izgradnjom brane ne dobijemo ekonomično iskorištavanje pada vode. Voda se tada strojarnici dovodi tunelom ili kanalom.

Prema visini pada vode razlikujemo:

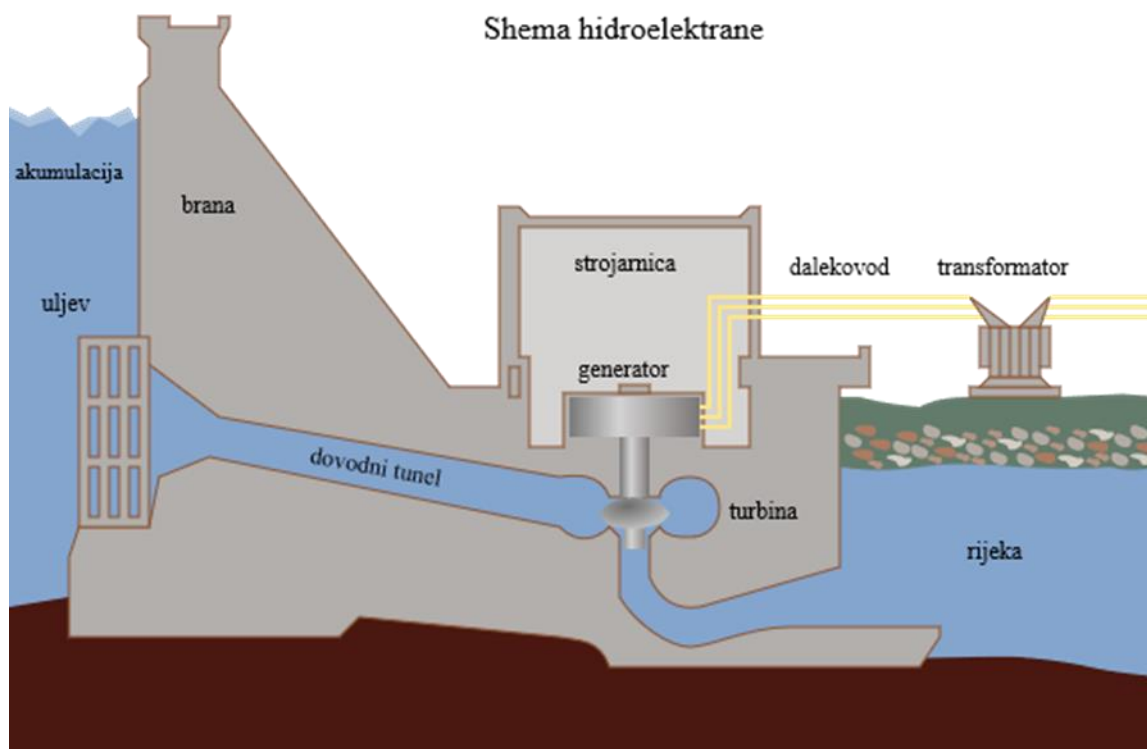
- Niskotlačne hidroelektrane – Dijele se na riječne i kanalske. Kod riječnih elektrana potrebni se pad osigurava pomoću vodne brane koja s dovodnim organom uz turbinsko postrojenje s generatorima čini jednu cjelinu. U niskotlačne hidroelektrane se uglavnom ugrađuju Kaplan turbine zbog malih padova ( padova do 50 metara ) i velikog protoka. Za padove do 20 metara koriste se i cijevne turbine u kruškastoj izvedbi. Kod kanalskih hidroelektrana pored pada uslijed podizanja brane koristi se i prirodni pad korita na određenoj duljini koji omogućuje izvedbu kanala na čijem kraju se izgradi strojarnica.
- Visokotlačne hidroelektrane – karakterizira ih dugi dovod i padovi veći od 50 metara. Dijelimo ih na hidroelektrane s i bez akumulacije, pribranske i derivacijske. Pribranske hidroelektrane najčešće imaju akumulacijsko jezero, obično se ugrađuju turbine tipa Francis osim kod manjih protoka gdje se ugrađuju turbine tipa Pelton. Derivacijske hidroelektrane mogu biti gravitacijske ili tlačne, uglavnom su to tlačne alpskog tipa s dugim dovodnim tunelom i tlačnim cjevovodom.

### Crpnoakumulacijske hidroelektrane:

- Crpnoakumulacijske hidroelektrane imaju mogućnost vraćanja iskorištene vode nazad u akumulacijsko jezero. One se nalaze između dva akumulacijska jezera i mogu se izmjenjivati između turbinskog i crpnog načina rada. U turbinskom načinu rada radi kao i svaka druga hidroelektrana, a u crpnom načinu rada radi kao potrošač električne energije gdje generator radi kao elektromotor. Cilj takve hidroelektrane je podizanje vode u gornji bazen i iskorištavanje iste za vrijeme vršnih opterećenja mreže.

### 3.2. Dijelovi hidroelektrane

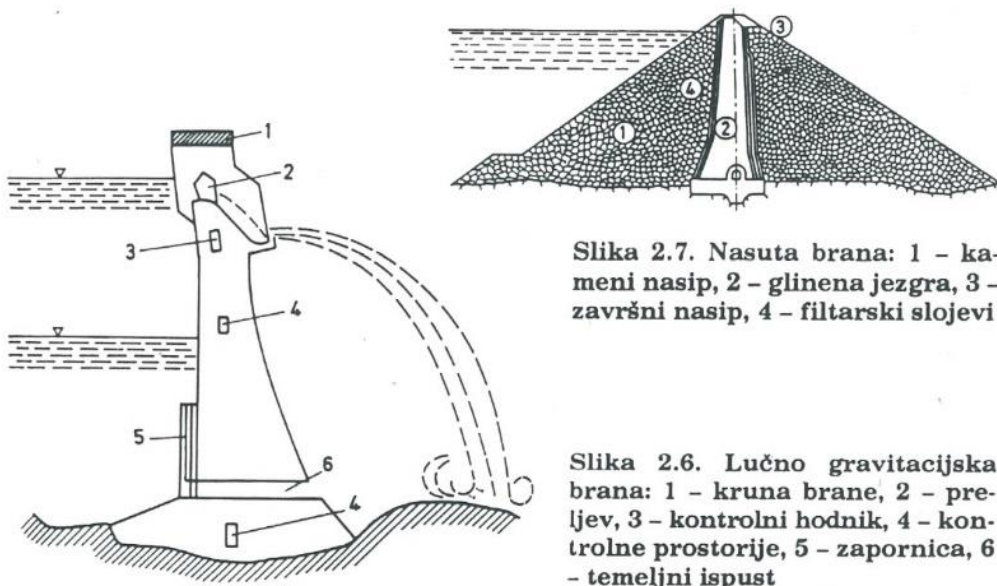
Dijelovi hidroelektrane podrazumijevaju sve dijelove za sakupljanje, dovođenje i odvođenje, pretvorbu i razvod proizvedene električne energije.



Slika 3.1. Shema hidroelektrane [13]

### 3.2.1. Vodne brane ili pregrade

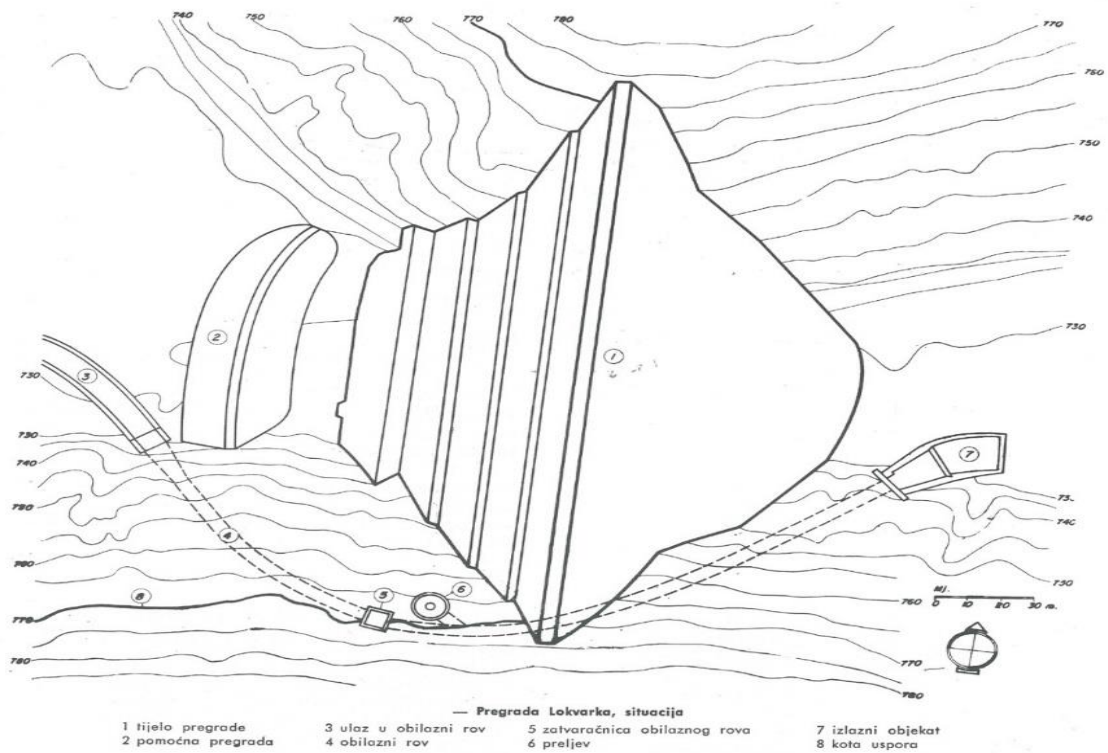
Vodne brane ili pregrade su građevine koje su osnovni dio hidroenergetskog postrojenja i imaju ulogu skretanja vodotoka prema zahvatu, povišenja vode radi ostvarivanja većeg pada i akumulaciju vode. Dva osnovna tipa brane su niske i visoke. Visoke brane su brane čija visina od temelja do krune iznosi više od 15 metara ili 10 metara, ali s krunom brane dužom od 500 metara dok su sve ostale brane niske. Prema geologiji terena dijelimo ih na nasute (zemljane) i masivne (betonske). Masivne se dijele na gravitacijske (brane koje vlastitom težinom drže masu vode), lučne (zakrivljene) i raščlanjene (brane kod kojih betonske ploče drži više stupova). Kod izgradnji brana treba uzeti u obzir manipulaciju vode od potpunog pražnjenja do prelijevanja vode. Tome služe preljevi i temeljni ispust. Kod nasutih brana organi za preljev nalaze se izvan brane zato što one ne dopuštaju preljev dok kod masivnih brana, ako nisu suviše visoke, prelijevanje preko njih je uvijek moguće. Preljevi se dimenzioniraju za velike vode koje bi se mogle pojaviti jednom u tisuću godina. Temeljni ispust služi za potpuno pražnjenje akumulacijskog jezera. Kod masivnih brana prolazi kroz tijelo brane, a kod nasutih brana vezan je za obilazne tunele.



Slika 2.7. Nasuta brana: 1 - kameni nasip, 2 - glinena jezgra, 3 - završni nasip, 4 - filtarski slojevi

Slika 2.6. Lučno gravitacijska brana: 1 - kruna brane, 2 - preljev, 3 - kontrolni hodnik, 4 - kontrolne prostorije, 5 - zapornica, 6 - temeljni ispust

Slika 3.2. Primjer nasute i masivne brane [3]

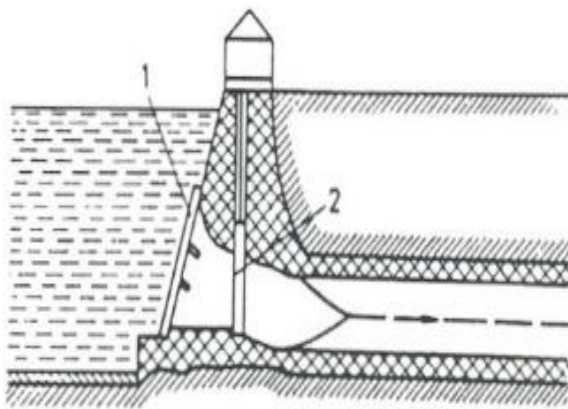


Slika 3.3. Primjer pozicije preljeva i obilazan tunel kod nasute brane [3]



### 3.2.2. Zahvat

Uloga zahvata (ulaznog uređaja) je usmjeravanje vode zadržane vodnom branom prema strojarnici. Kod niskih brana gdje je razina vode uglavnom konstantna, zahvat se nalazi na i izvan površine vode dok se kod visokih brana nalazi ispod površine vode. Protok vode kroz zahvat regulira se pomoću zapornica.



Slika 2.10. Zahvat vode: 1 - fina rešetka, 2 - zapornica

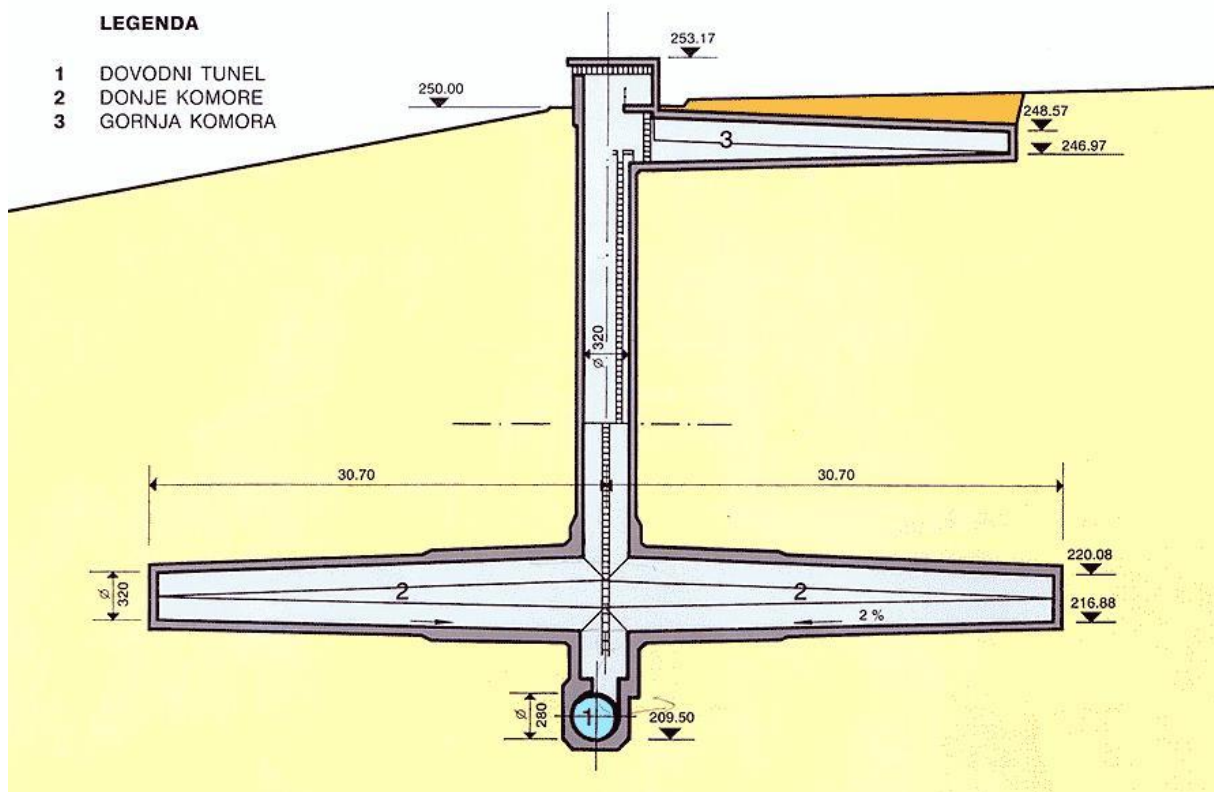
Slika 3.4. Primjer zahvata [3]

### 3.2.3. Dovod vode

Dovod vode je poveznica između zahvata i vodne komore. Ovisno o konfiguraciji terena i pogonskim uvjetima može biti izveden kao tunel ili kao kanal. Najčešće se izvodi kao tlačni tunel.

### 3.2.4. Vodna komora

Vodna komora se nalazi na kraju dovoda i prije ulaza u tlačni cjevovod. Zadatak vodne komore je amortizirati porast tlaka nastalog prilikom ljuljanja vodenih masa, zaustavljanja i pokretanja pogona te spriječiti ulazak zraka u cjevovod.



Slika 3.5. Primjer vodne komore [10]

### 3.2.5. Zasunska komora

Zasunska komora sa zatvaračem (ventilom) nalazi se iza vodne komore na ulazu u tlačni cjevovod. Karakteristike cjevovoda i elektrane određuju koji tip zatvarača koristimo (uglavnom leptirasti). Zadatak vodne komore (ventila) je osigurati sigurno zatvaranje dotoka vode tlačnom cjevovodu. Uz glavni zatvarač izvodi se i pomoćni koji se koristi tijekom pregleda i remonta glavnog zatvarača kao i obilazni vod (by-pass), manjeg promjera od tlačnog cjevovoda, čiji je zadatak izjednačavanje tlaka prije i poslije zatvarača.

### 3.2.6. Tlačni cjevovod

Tlačni cjevovod, najčešće izveden od čelika, služi za dovod vode strojarnici. Postavljen je u tunelu ili na površini zemlje koso ili vertikalno. Završava nesimetričnom račvom čija je uloga raspodjela vode pojedinim turbinama te predturbinskim zatvaračem (kuglastim ili leptirastim).

### 3.2.7. Strojarnica

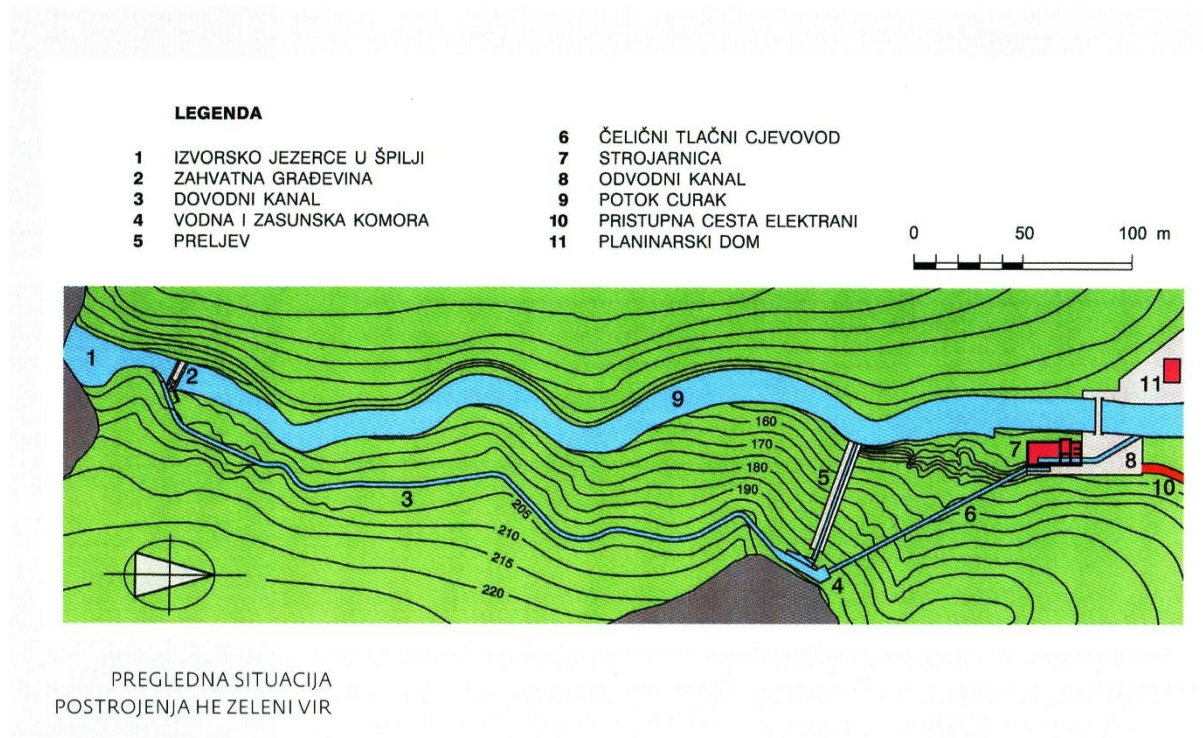
Strojarnica je dio hidroelektrane u kojoj su smješteni turbogeneratori (najčešće više istih), dizalica, regulatori, kompresori, drenaža, crpke za rashladnu vodu, ventilacija itd. Može biti nadzemna ili podzemna, a izvodi se prema konfiguraciji terena i sigurnosnim razlozima. Dizalica unutar strojarnice izvodi se prema težini dijelova turbogeneratora. Kod podzemnih strojarnica mora biti osigurana dobra ventilacija i klimatizacija kako bi se spriječila pojava kondenzacije i vlage na strojevima i aparatima. U slučaju da dođe do ispadanja iz električne mreže ili naglog povećanja tlaka uključuje se zaštita koja sprječava protok vode kroz turbinu i odvodi vodu direktno u odvodni kanal.

### 3.2.8. Odvod vode

Zadatak odvoda je da vodu, nakon prolaska kroz turbinu, vrati nazad u korito rijeke, more ili u dovodni tunel za sljedeću hidroelektranu u nizu. U slučaju da je strojarnica udaljena od korita, koristi se kanal za odvod vode u rijeku.

## 4. HIDROENERGETSKI SUSTAV ZELENI VIR

Hydroenergetski sustav Zeleni Vir, izgrađen 1921. g., visokotlačno je derivacijsko postrojenje smješteno pored sela Skrad u Gorskom kotaru te je izvedeno tako da koristi vodotok s izvora potoka Curak. Zajedno sa CHE Fužine, RHE Lepenica i akumulacijskim jezerom Lokve čini HE Gorski kotar u sklopu HE Vinodol-Tribalj. Sastoji se od vodne pregrade sa zahvatom, dovodnog kanala, vodne i zasunske komore, tlačnog cjevovoda i odvodnog kanala. Vodotok izvora Curak varira ovisno o sezoni pa tako iznosi od 1 m<sup>3</sup>/s tijekom sušne sezone do 30 m<sup>3</sup>/s tijekom kišne sezone. Nakon obilnih padalina može iznositi i do 60 m<sup>3</sup>/s. Ukupna prosječna godišnja proizvodnja hidroelektrane Zeleni Vir iznosi 7.39 GWh s dva agregata snage od 1.7 MW (0.9 + 0.8 MW).



Slika 4.1. Pregledna situacija postrojenja Zeleni Vir



*Slika 4.2. Hidroelektrana Zeleni Vir*

#### 4.1. Vodna pregrada sa zahvatom

Vodna pregrada sa zahvatom izvedena je na samom izvoru potoka Curak u špilji Zeleni Vir koja se nalazi na 357 m. n. v. Ulazni uređaj omogućava odvod vode u dovodni tunel, a višak vode koji se ne koristi u proizvodnji otječe preko preljeva širine 13.5 m.



Slika 4.3. Vodna pregrada sa zahvatom na izvoru

## 4.2. Dovodni tunel

Dovodni tunel je poprečnog pravokutnog presjeka širine 1.5 m, visine 2 m i transportira vodu iz izvora do vodne komore postrojenja. Dužina dovodnog tunela iznosi 326 m i većim dijelom je natkriven šetnicom koja vodi do slapa. Donja i gornja ploča kanala izrađene su od 0.2 m debelog betona dok su bočne strane kanala izrađene su od kamena u mortu debljine 0.6 m.



Slika 4.4. Unutrašnjost dovodnog tunela [3]





*Slika 4.5. Šetnica prema izvoru koja prekriva dovodni tunel*

### 4.3. Vodna komora

Vodna komora, izgrađena na kraju dovodnog kanala, dimenzija 5.8 m x 20 m x 2.8 m nalazi se na geometrijskoj koti 344 m. n. v. Volumen vodne komore zajedno s volumenom dovodnog tunela iznosi 1 400 m<sup>3</sup>. Unutar vodne komore nalazi se ispušt za ispuštanje viška vode i ispušt na koji se nadovezuje tlačni cjevovod. Funkcija vodne komore je da se prije ulaska vodne turbine u pogon osigura određena količina vode prije nego što se uspostavi stacionarno tečenje u dovodnom kanalu te da prihvati dio vode koji bi se inače vratio u dovodni tunel tijekom zaustavljanja turbina. Time se izbjegava nagla promjena brzine u dovodnom kanalu i smanjuje mogućnost pojave vodnog udara. Vodna komora otvorenog je tipa što omogućava višku vode da se prelije preko bočne stranice iste. Prije ulaza u tlačni cjevovod nalazi se rešetka, a cijela komora prekrivena je rešetkastim gazištem i plastičnom mrežom čije su funkcije sprječavanja pada kamenja, grana, lišća i drugih nečistoća koje bi mogle oštetiti i onesposobiti sustav.



Slika 4.6. Vodna komora

#### 4.4. Tlačni cjevovod

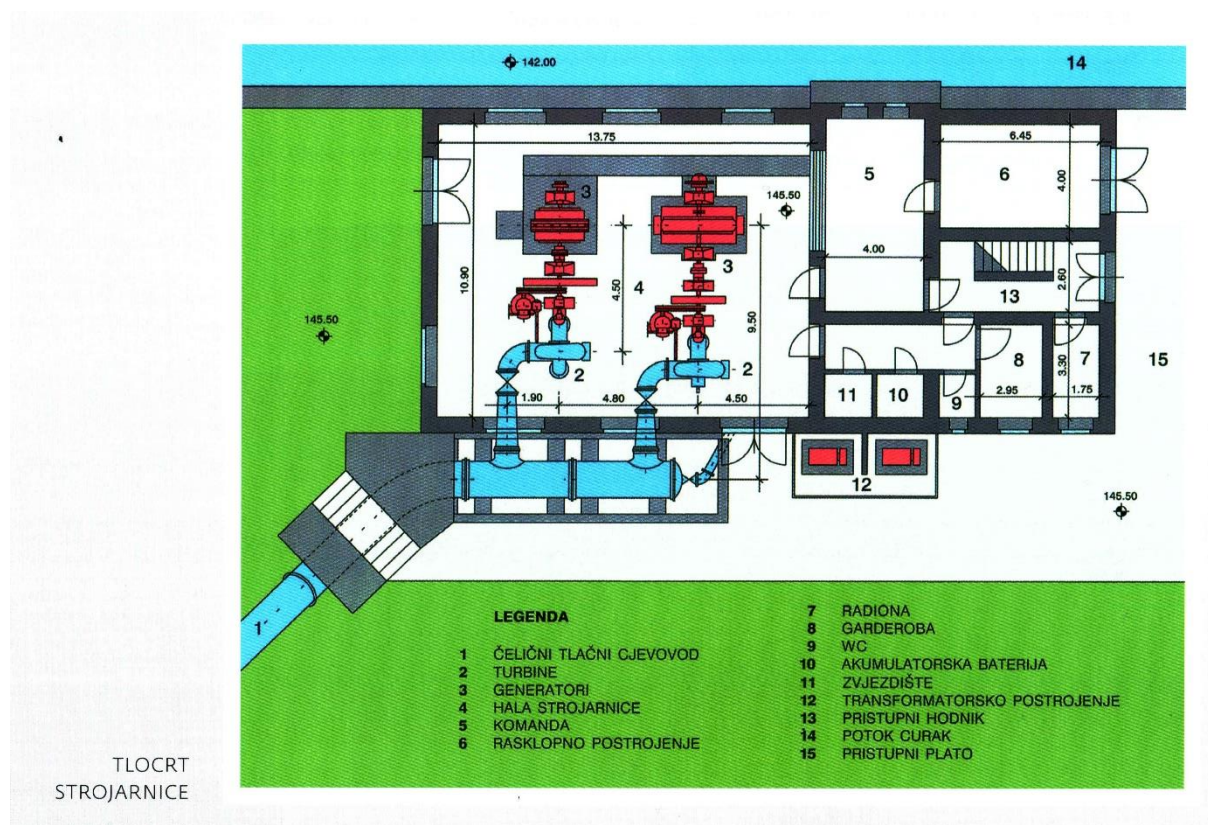
Tlačni cjevovod dovodi vodu iz vodne komore u strojarnicu gdje se nalaze turbine. U cijelosti je izgrađen od čelika i ukupno je dug 92 m. Njegov promjer iznosi 1.3 m i oslonjen je na kamene temelje. Završava nesimetričnom račvom koja je izvedena tako da uzrokuje veće hidrauličke gubitke.



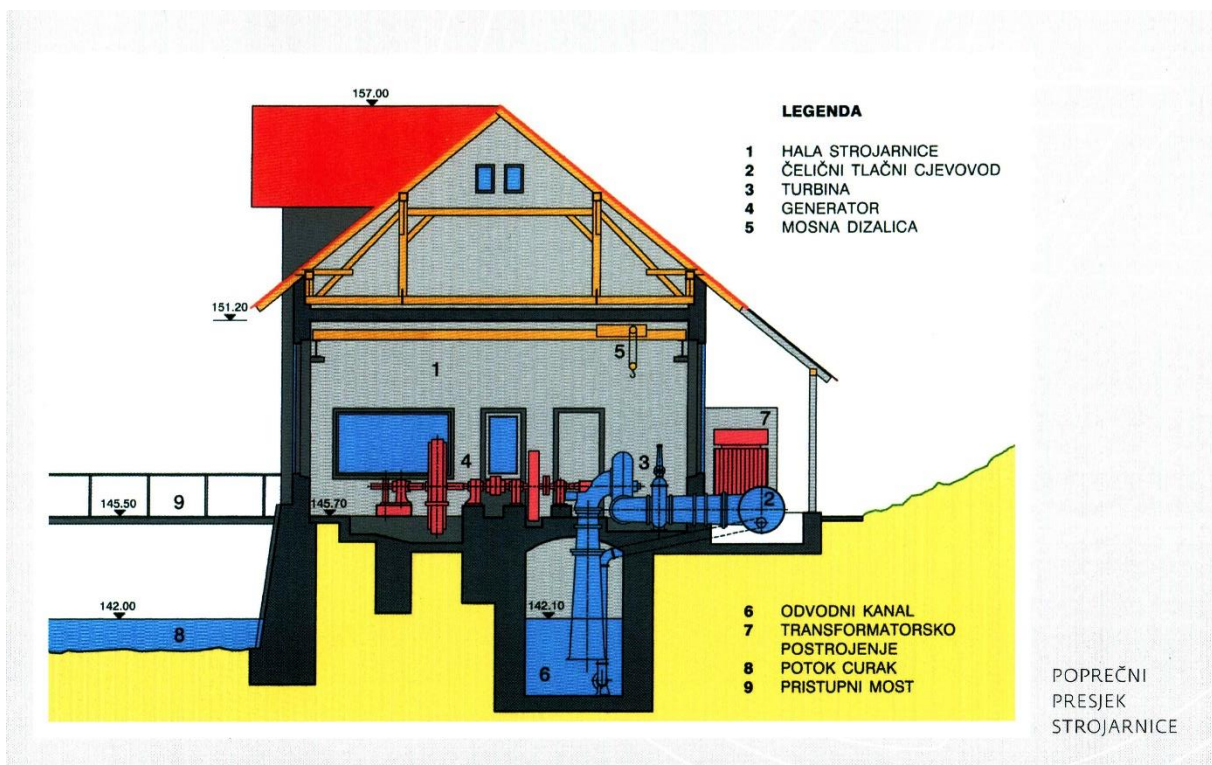
Slika 4.7. Tlačni cjevovod

## 4.5. Strojarnica

Strojarnica hidroelektrane Zeleni Vir dimenzija je 26.15 m x 11.8 m i građena je u stilu industrijske arhitekture 20. stoljeća. Nalazi se na 301 m. n. v. U strojarnici su instalirane 2 turbine sa spiralnom Francis turbinom u horizontalnoj izvedbi te generatorom koji se nalazi na istoj osovini. Između cjevovoda i kućišta nalazi se zatvarač za zatvaranje dotoka vode iz cjevovoda i by-pass koji služi za izjednačavanje tlaka prije i poslije zatvarača. Na osovini između turbine i generatora nalazi se kotač zamašnjak promjera 2 m i težine 1 850 kg. Turbine su proizvođača Siemens i Končar, instalirane 1921. g. i 1961. g., snaga 0.7 i 0.8 MW koje ostvaruju uz protok od 2.2 m<sup>3</sup>/s pri padu od 50 m. Snaga generatora iznosi 1 020 MVA uz  $\cos \Phi = 0.8$ . Opremljena je i mostnom dizalicom nosivosti 5 tona te kontrolnim pultom.



Slika 4.8. Tlocrt strojarnice [8]



Slika 4.9. Poprečni presjek strojarnice [8]



Slika 4. 10. Unutrašnjost strojarnice [9]

#### 4.6. Odvodni tunel

Odvodni tunel pravokutnog poprečnog presjeka dimenzija, 1.9 m x 1.8 m s polukrugom radijusa 0.9 m, vodu iz strojarnice prije je odvodio nazad u korito potoka Curak međutim, izgradnjom nove hidroelektrane nizvodno od elektrane Zeleni Vir, odvodni kanal postao je dovodni kanal nove hidroelektrane.



Slika 4.11. Odvodni tunel

## **5. HIDROELKTRANA CURAK**

Hidroelektrana Curak protočna je hidroelektrana izgrađena i puštena u pogon 2018. g. Nalazi se na 281 m. n. v. Za razliku od HE Zeleni Vir te nije u vlasništvu HEP proizvodnje nego je u cijelosti privatnom vlasništvu. Sastavljena je od dovodnog cjevovoda, strojarnice i odvodnog kanala.



*Slika 5. 1. HE Curak*

## 5.1. Dovodni tunel

Dovodni tunel hidroelektrane Curak sačinjen je od odvodnog tunela hidroelektrane Zeleni Vir i cjevovoda koji se spaja na odvodni tunel. Cjevovod je kružnog poprečnog presjeka s promjerom od 1.7 metara i ukupno je dugačak 750 metara.



*Slika 5. 2. Dijelovi cjevovoda HE Curak*



## 5.2. Strojarnica

Strojarnica hidroelektrane Curak dimenzija je 9 m x 7 m. Unutar strojarnice nalazi se 1 Francis turbina u vertikalnoj izvedbi snage 560 kW. Između cjevovoda i kućišta nalazi se zatvarač za zatvaranje dotoka vode iz cjevovoda i by-pass koji služi za izjednačavanje tlaka prije i poslije zatvarača. Opremljena je kontrolnim pultom i mostnom dizalicom.



Slika 5. 3. Unutrašnjost strojarnice

### 5.3. Odvodni kanal

Odvodni kanal dimenzija je 4 m x 2 m i odvodi vodu iz elektrane nazad u korito potoka Curak.

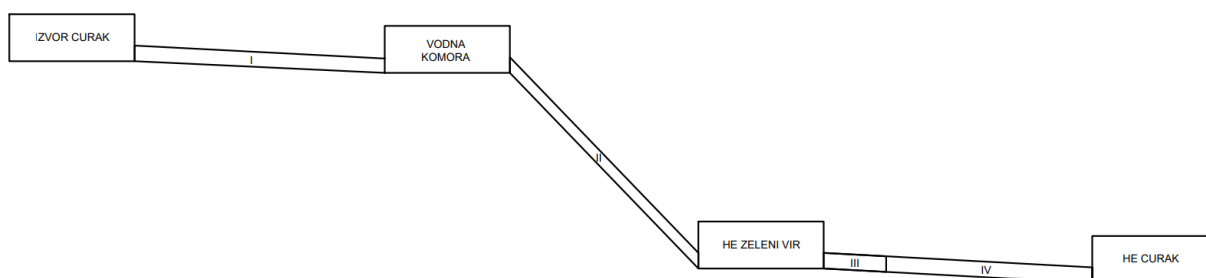


Slika 5. 4. Odvodni kanal

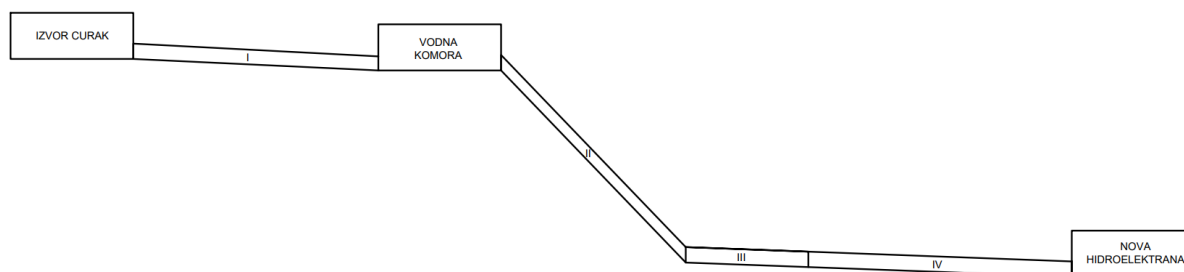
## 6. PRORAČUN NOVE HIDROELEKTRANE

### 6.1. Računanje gubitaka cjevovoda u sustavu

Kako je cilj ovog rada bio zamijeniti HE Zeleni Vir i HE Curak jednom većom hidroelektranom na kraju sustava, koja bi koristila već postojeće dovodne tunele i tlačne cjevovode, za početak je trebalo izračunati gubitke unutar cjevovoda. Te cjevovode podijelili smo na pojedine segmente te smo gubitke u njima računali pojedinačno za instalirani protok od  $4.4 \text{ m}^3/\text{s}$  i 50% veći protok od  $6.6 \text{ m}^3/\text{s}$  te ih na kraju sve zbrojili.



Slika 6. 1. Model postojećeg postrojenja podijeljen na segmente



Slika 6. 2. Model postrojenja sa novom elektranom

Gubitke fluida unutar cjevovoda možemo podijeliti na dvije vrste: dužinske i lokalne.

Dužinski gubici su gubici koji nastaju pri strujanju fluida kroz cijevi i računaju se formulom:

$$H_{gtr} = \lambda \times \frac{l}{d} \times \frac{v^2}{2 \times g} \quad (6.1)$$

Gdje je:

$H_{gtr}$  – dužinski gubici (m)

$\lambda$  – koeficijent trenja

$l$  – duljina cjevovoda (m)

$d$  – promjer cjevovoda (m)

$v$  – brzina strujanja (m/s)

$g$  – sila teža (m/s<sup>2</sup>)

Lokalni gubici su gubici koji nastaju zbog promjene pravca strujanja i promjene lokalnih brzina strujanja. Koeficijent trenja iznosi  $\lambda = 0.015$

Lokalni gubici računaju se formulom:

$$H_g = \xi \times \frac{v^2}{2 \times g} \quad (6.2)$$

Gdje je:

$H_g$  – lokalni gubici (m)

$\xi$  – koeficijent lokalnih gubitaka

$v$  – brzina strujanja (m/s)

$g$  – sila teža (m/s<sup>2</sup>)

Lokalni gubici u sustavu iznose 10% dužinskih gubitaka.

Kako ne znamo brzinu strujanja fluida kroz cjevovod, tu brzinu smo izrazili preko sljedeće formule:

$$v = \frac{Q}{A} \quad (6.3)$$

Gdje je:

$v$  – brzina strujanja (m/s)

$Q$  – protok (m<sup>3</sup>/s)

$A$  – površina presjeka (m<sup>2</sup>)

#### 6.1.1. Segment I

Segment I je dovodni tunel pravokutnog oblika za koji znamo sljedeće vrijednosti:

Širina  $a = 1.5$  m

Visina  $b = 2$  m

Dužina  $l = 326$  m

Izračunamo površinu presjeka:

$$A_1 = a \times b = 1.5 \times 2 = 3\text{m}^2$$

Izračunamo gubitke za oba protoka:

$$H_{gtr_{1_1}} = \lambda \times \frac{l_1}{d_1} \times \frac{v_1^2}{2 \times g} = \lambda \times \frac{l_1}{\sqrt{\frac{4 \times A_1}{\pi}}} \times \frac{\left(\frac{Q_1}{A_1}\right)^2}{2 \times g} = 0.015 \times \frac{326}{\sqrt{\frac{4 \times 3}{3.14}}} \times \frac{\left(\frac{4.4}{3}\right)^2}{2 \times 9.81} = 0.2743\text{m}$$

$$Hgtr_{1_2} = \lambda \times \frac{l_1}{d_1} \times \frac{v_1^2}{2 \times g} = \lambda \times \frac{l_1}{\sqrt{\frac{4 \times A_1}{\pi}}} \times \frac{\left(\frac{Q_2}{A_1}\right)^2}{2 \times g} = 0.015 \times \frac{326}{\sqrt{\frac{4 \times 3}{3.14}}} \times \frac{\left(\frac{6.6}{3}\right)^2}{2 \times 9.81} = 0.6171m$$

$$Hg_{1_1} = Hgtr_{1_1} \times \frac{10}{100} = 0.2743 \times \frac{10}{100} = 0.02743m$$

$$Hg_{1_2} = Hgtr_{1_2} \times \frac{10}{100} = 0.6171 \times \frac{10}{100} = 0.06171m$$

Ukupni gubitci:

$$H_{1_1} = Hgtr_{1_1} + Hg_{1_1} = 0.2743 + 0.02743 = 0.3017m$$

$$H_{1_2} = Hgtr_{1_2} + Hg_{1_2} = 0.6171 + 0.06171 = 0.6788m$$

### 6.1.2. Segment II

Segment II je tlačni cjevovod kružnog oblika za koji znamo sljedeće vrijednosti:

Promjer cjevovoda  $d = 1.3 \text{ m}$

Dužina cjevovoda  $l = 92 \text{ m}$

Izračunamo površinu presjeka:

$$A_2 = \frac{d^2 \times \pi}{4} = \frac{1.3^2 \times 3.14}{4} = 1.3267m^2$$

Izračunamo gubitke za oba protoka:

$$Hgtr_{2_1} = \lambda \times \frac{l_2}{d_2} \times \frac{v_2^2}{2 \times g} = \lambda \times \frac{l_2}{d_2} \times \frac{\left(\frac{Q_1}{A_2}\right)^2}{2 \times g} = 0.015 \times \frac{92}{1.3} \times \frac{\left(\frac{4.4}{1.3267}\right)^2}{2 \times 9.81} = 0.5951m$$

$$Hgtr_{2_2} = \lambda \times \frac{l_2}{d_2} \times \frac{v_2^2}{2 \times g} = \lambda \times \frac{l_2}{d_2} \times \frac{\left(\frac{Q_2}{A_2}\right)^2}{2 \times g} = 0.015 \times \frac{92}{1.3} \times \frac{\left(\frac{6.6}{1.3267}\right)^2}{2 \times 9.81} = 1.339m$$

$$Hg_{2_1} = Hgtr_{2_1} \times \frac{10}{100} = 0.5951 \times \frac{10}{100} = 0.05951m$$

$$Hg_{2_2} = Hgtr_{2_2} \times \frac{10}{100} = 1.339 \times \frac{10}{100} = 0.1339m$$

Ukupni gubitci:

$$H_{2_1} = Hgtr_{2_1} + Hg_{2_1} = 0.5951 + 0.05951 = 0.6546m$$

$$H_{2_2} = Hgtr_{2_2} + Hg_{2_2} = 1.339 + 0.1339 = 1.4729m$$

### 6.1.3. Segment III

Segment 3 je odvodni tunel HE Zeleni Vir, ali i dovodni tunel HE Curak koji je pravokutnog presjeka s polukrugom na vrhu za koji su poznate sljedeće vrijednosti:

Širina  $a = 1.8$  m

Visina  $b = 2.8$  m (1.9 m bez polukruga)

Polumjer polukruga  $r = 0.9$  m

Dužina  $l = 125$  m

Izračunamo površinu presjeka:

$$A_3 = a \times b + r^2 \times \pi = 1.8 \times 1.9 + \frac{0.9^2 \times 3.14}{2} = 5.0717m^2$$

Izračunamo gubitke za oba protoka:

$$H_{gtr_{3_1}} = \lambda \times \frac{l_3}{d_3} \times \frac{v_3^2}{2 \times g} = \lambda \times \frac{l_3}{\sqrt{\frac{4 \times A_3}{\pi}}} \times \frac{\left(\frac{Q_1}{A_3}\right)^2}{2 \times g} = 0.015 \times \frac{125}{\sqrt{\frac{4 \times 5.0717}{3.14}}} \times \frac{\left(\frac{4.4}{5.0717}\right)^2}{2 \times 9.81} = 0.0283m$$

$$H_{gtr_{3_2}} = \lambda \times \frac{l_3}{d_3} \times \frac{v_3^2}{2 \times g} = \lambda \times \frac{l_3}{\sqrt{\frac{4 \times A_3}{\pi}}} \times \frac{\left(\frac{Q_2}{A_3}\right)^2}{2 \times g} = 0.015 \times \frac{125}{\sqrt{\frac{4 \times 5.0717}{3.14}}} \times \frac{\left(\frac{6.6}{5.0717}\right)^2}{2 \times 9.81} = 0.7377m$$

$$H_{g_{3_1}} = H_{gtr_{3_1}} \times \frac{10}{100} = 0.0283 \times \frac{10}{100} = 2.83 \times 10^{-3}m$$

$$H_{g_{3_2}} = H_{gtr_{3_2}} \times \frac{10}{100} = 0.7377 \times \frac{10}{100} = 0.07377m$$

Ukupni gubitci:

$$H_{3_1} = H_{gtr_{3_1}} + H_{g_{3_1}} = 0.0283 + 2.83 \times 10^{-3} = 0.03113m$$

$$H_{3_2} = H_{gtr_{3_2}} + H_{g_{3_2}} = 0.7377 + 0.07377 = 0.8115m$$

#### 6.1.4. Segment IV

Segment 4 je dovodni cjevovod kružnog poprečnog presjeka za koji znamo sljedeće vrijednosti:

Promjer cjevovoda  $d = 1.7 \text{ m}$

Dužina cjevovoda  $l = 750 \text{ m}$

Izračunamo površinu presjeka:

$$A_4 = \frac{d^2 \times \pi}{4} = \frac{1.7^2 \times 3.14}{4} = 2.2687m^2$$

Izračunamo gubitke za oba presjeka:



$$Hgtr_{4_1} = \lambda \times \frac{l_4}{d_4} \times \frac{v_4^2}{2 \times g} = \lambda \times \frac{l_4}{d_4} \times \frac{\left(\frac{Q_1}{A_4}\right)^2}{2 \times g} = 0.015 \times \frac{750}{1.7} \times \frac{\left(\frac{4.4}{2.2687}\right)^2}{2 \times 9.81} = 1.2687m$$

$$Hgtr_{4_2} = \lambda \times \frac{l_4}{d_4} \times \frac{v_4^2}{2 \times g} = \lambda \times \frac{l_4}{d_4} \times \frac{\left(\frac{Q_2}{A_4}\right)^2}{2 \times g} = 0.015 \times \frac{750}{1.7} \times \frac{\left(\frac{6.6}{2.2687}\right)^2}{2 \times 9.81} = 2.8545m$$

$$Hg_{4_1} = Hgtr_{4_1} \times \frac{10}{100} = 1.2687 \times \frac{10}{100} = 0.12687m$$

$$Hg_{4_2} = Hgtr_{4_2} \times \frac{10}{100} = 2.8545 \times \frac{10}{100} = 0.2855m$$

Ukupni gubitci:

$$H_{4_1} = Hgtr_{4_1} + Hg_{4_1} = 1.2678 + 0.12687 = 1.3956m$$

$$H_{4_2} = Hgtr_{4_2} + Hg_{4_2} = 2.8545 + 0.2855 = 3.14m$$

#### 6.1.5. Ukupni gubitci cjevovoda u sustavu

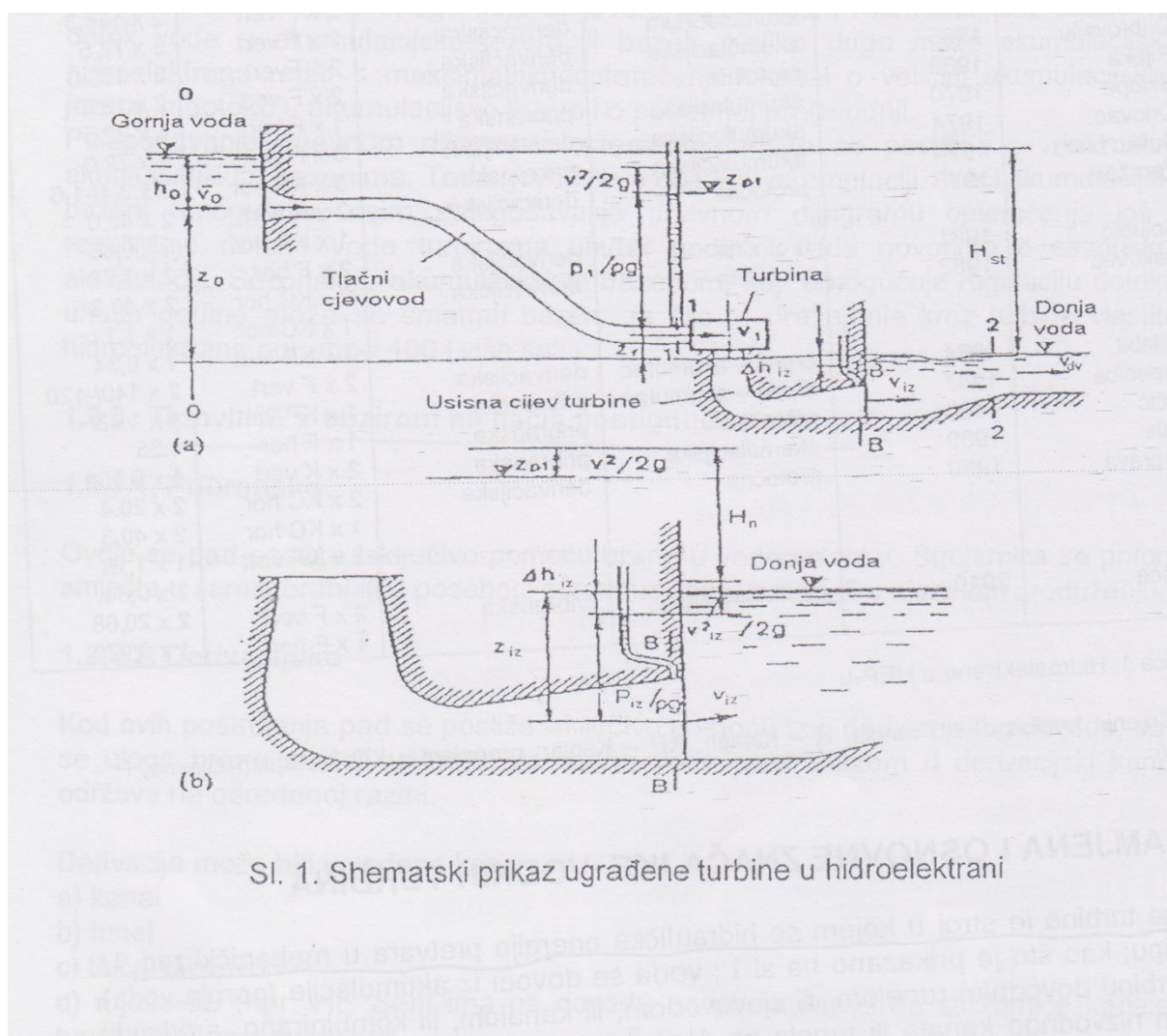
$$Hgub_1 = H_{1_1} + H_{2_1} + H_{3_1} + H_{4_1} = 0.3017 + 0.6546 + 0.03113 + 1.3956 = 2.383m$$

$$Hgub_2 = H_{1_2} + H_{2_2} + H_{3_2} + H_{4_2} = 0.6788 + 1.4729 + 0.8115 + 3.14 = 6.1032m$$

## 6.2. Proračun bruto i neto pada

### 6.2.1. Bruto pad

Bruto pad je razlika energija između dva presjeka u protočnom kanalu u kojem je ugrađena proizvodna jedinica. Bruto pad se također može definirati i kao razlika između razine gornje i donje vode dok voda ne teče.



Sl. 1. Shematski prikaz ugrađene turbine u hidroelektrani

Slika 6.3. Shematski prikaz računanja bruto pada [1]

$$H_b = H_{st} + \frac{v_0^2}{2 \times g} - \frac{v_{dv}^2}{2 \times g} \quad (6.5)$$

Gdje je:

$H_b$  – bruto pad (m)

$H_{st}$  – razlika između razine gornje i donje vode (m)

$v_0$  – brzina gornje vode (m/s)

$v_{dv}$  – brzina donje vode (m/s)

$g$  – sila teža ( $m/s^2$ )

U našem slučaju, ako uzmemo da voda miruje, dobit ćemo:

Kota gornje vode 357.18 m

Kota donje vode 280.60 m

$$H_b = H_{st} = 357.18 - 280.60 = 75.85 \approx 76m$$

## 6.2.2. Neto pad

Neto pad je stvarni, tj. korisni pad raspoloživ turbini za obavljanje rada. Dobiva se tako da se od bruto pada oduzmu gubitci nastali u cjevovodu.

$$H_n = H_b - H_{gub} = H_{st} + \frac{v_0^2}{2 \times g} - \frac{v_{dv}^2}{2 \times g} - H_{gub} \quad (6.6)$$

Gdje je:

$H_n$  – neto pad (m)

$H_b$  – bruto pad (m)

$H_{gub}$  – ukupni gubitci (m)

Za  $Q = 4.4 \text{ m}^3/\text{s}$ :

$$H_n = H_b - H_{gub_1} = 76 - 2.383 = 73.617 \text{ m}$$

Za  $Q = 6.6 \text{ m}^3/\text{s}$ :

$$H_n = H_b - H_{gub_2} = 76 - 6.1032 = 69.8968 \text{ m}$$

### 6.3. Traženje promjera turbine preko bezdimenzijskih značajki

#### 6.3.1. Karakteristike turbostrojeva

Hidraulički dijelovi turbostrojeva projektiraju se za zadane radne uvjete: protok  $Q$ , specifičnu snagu  $H$  i broj okretaja  $n$ . Zatim se oblici i veličine protočnih kanala odabiru tako da hidraulički gubitci budu minimalni. Pri zadanim (idealnim) uvjetima turbostroj ima proračunski režim rada. U stvarnim uvjetima režim rada se može razlikovati od proračunskog rada gdje, na primjer, može doći do većeg otpora unutar cjevovoda ili dovodnog tunela pa se samim time mijenja i snaga. Za pravilnu eksploataciju turbostroja moramo znati kako se te vrijednosti mijenjaju kako bismo dobili maksimalnu iskoristivost turbostroja. U našem slučaju računat ćemo potreban promjer cjevovoda turbine kada bi se instalirani protok od  $4.4 \text{ m}^3/\text{s}$  povećao za 50% na  $6.6 \text{ m}^3/\text{s}$ .

#### 6.3.2. Specifična brzina vrtnje

Specifična brzina vrtnje (brzohodnost)  $n_q$  predstavlja specifičnu brzinu vrtnje stroja koji kod jediničnog rada od 1 m radi s protokom od  $1 \text{ m}^3/\text{s}$ .

$$n_q = 157 \times \sigma = n \times \frac{\sqrt{Q}}{H_n^{0.75}} \quad (6.7)$$

Gdje je:

$n_q$  – specifična brzina vrtnje

$n$  – broj okretaja u minuti (okr/min)

$Q$  – protok ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$H_n$  – neto pad (m)

Kako je plan u novu elektranu ugraditi 2 turbine, protok ćemo podijeliti između te 2 turbine i izračunati brzohodnost pri različitim brojevima okretaja u minuti za oba protoka.

Za protoke od  $4.4 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $Q = 2.2 \text{ m}^3/\text{s}$ ) i  $6.6 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $Q = 3.3 \text{ m}^3/\text{s}$ ), preko zadane formule, izračunali smo brzohodnost i rezultate unijeli u tablicu.

### 6.3.3. Bezdimenzijska specifična brzina vrtnje

Bezdimenzijski broj  $\sigma$  moramo izračunati kako bismo preko Cordierovog dijagrama odredili  $\delta$ .

$$\sigma = 6.33 \times 10^{-3} \times n_q \quad (6.8)$$

Gdje je:

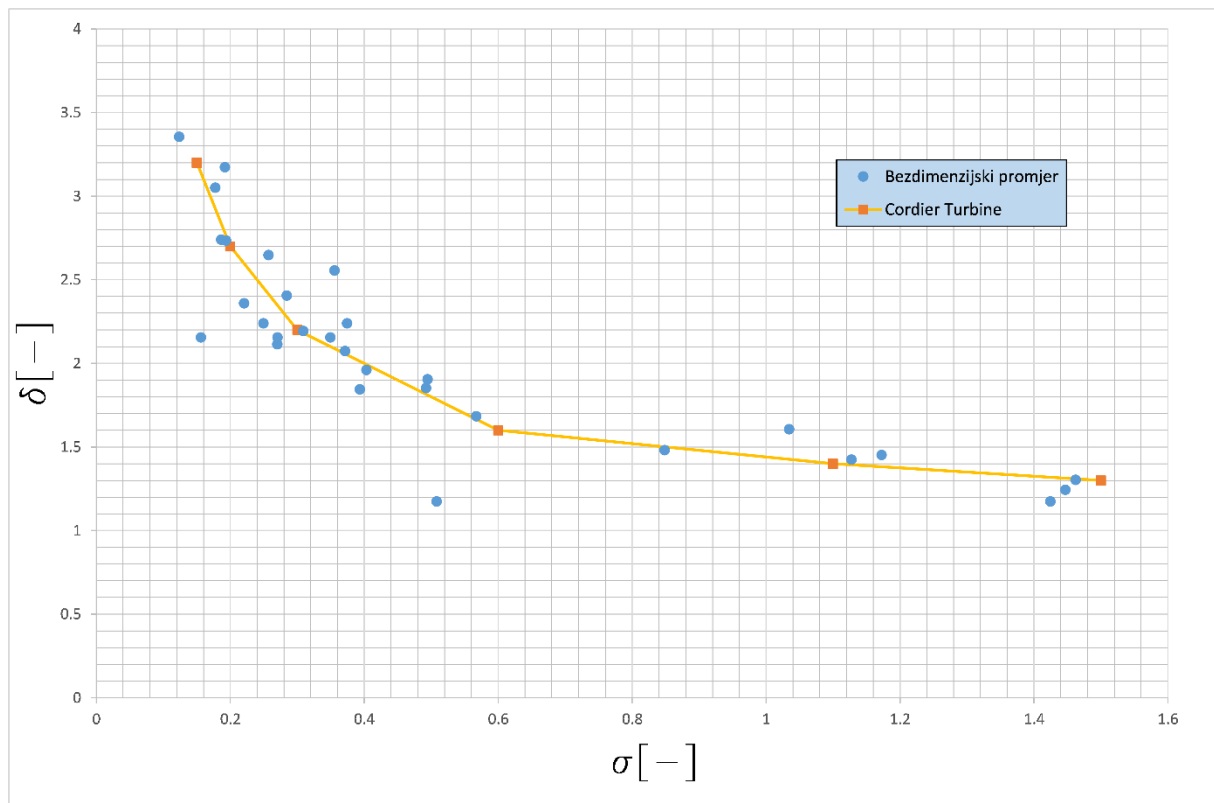
$\sigma$  – bezdimenzijska specifična brzina vrtnje

$n_q$  - brzohodnost

Za protoke  $4.4 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $Q = 2.2 \text{ m}^3/\text{s}$ ) i  $6.6 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $Q = 3.3 \text{ m}^3/\text{s}$ ), preko zadane formule, izračunali smo bezdimenzijsku specifičnu brzinu vrtnje i rezultate unijeli u tablicu.

### 6.3.4. Cordierov dijagram

U Cordierovom dijagramu karakteristike  $\sigma$  i  $\delta$  vezane su međusobno iskustvenim odnosom. Točke unutar dijagrama predstavljaju turbostroj u radnim uvjetima koji ostvaruje svoj najveći stupanj iskoristivosti. Svaka takva točka definirana je vrijednostima brzohodnosti  $\sigma$  i bezdimenzijskog promjera  $\delta$ . Na taj način poznavanjem brzohodnosti možemo odrediti bezdimenzijski promjer.



Slika 6. 4. Primjer Cordierovog dijagrama

Iz Cordierovog dijagrama poznavanjem brzohodnosti očitamo  $\delta$  za protok od  $4.4 \text{ m}^3/\text{s}$ :

okr/min	$\sigma$	$\delta$
3000	1,1207	1,4
1500	0,5604	1,68
1000	0,3736	2,05
750	0,2802	2,3
600	0,2241	2,59
500	0,1868	2,75
428,5714	0,1601	3,05
375	0,1401	3,2
333,3333	0,1245	/
300	0,1121	/
272,7272	0,1019	/
250	0,0934	/

Tablica 6. 1. Veza  $\sigma$  i  $\delta$  za  $Q = 4.4 \text{ m}^3/\text{s}$

Iz Cordierovog dijagrama poznavanjem brzohodnosti očitamo  $\delta$  za protok od  $6.6 \text{ m}^3/\text{s}$ :

okr/min	$\sigma$	$\delta$
3000	1,4270	1,32
1500	0,7135	1,56
1000	0,4757	1,85
750	0,3568	2,19
600	0,2854	2,3
500	0,2378	2,5
428,5714	0,2039	2,7
375	0,1784	2,98
333,3333	0,1586	3,11
300	0,1427	3,2
272,7272	0,1297	/
250	0,1189	/

Tablica 6. 2. Veza između  $\sigma$  i  $\delta$  za  $Q = 6.6 \text{ m}^3/\text{s}$



## 6.3.5. Računanje promjera turbostroja

Poznavanjem bezdimenzijskih značajki  $\sigma$  i  $\delta$  možemo izračunati promjer turbostroja  $d$ :

$$\delta = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \times d \times \sqrt{\frac{2 \times g \times H_n}{Q^2}} \Rightarrow d = \frac{\delta}{\sqrt{\frac{\pi}{2}} \times \sqrt{\frac{2 \times g \times H_n}{Q^2}}} \quad (6.9)$$

Gdje je:

$\delta$  – bezdimenzijski promjer

$d$  – promjer ulaznog i izlaznog cjevovoda (m)

$g$  – sila teža ( $\text{m/s}^2$ )

$H_n$  – neto pad (m)

$Q$  – protok ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

Promjer turbostroja za protoke od  $4.4 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $Q = 2.2 \text{ m}^3/\text{s}$ ) i  $6.6 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $Q = 3.3 \text{ m}^3/\text{s}$ ), preko zadane formule, izračunali smo promjere turbostrojeva i rezultate unijeli u tablicu.

### 6.3.6. Površine promjera turbostroja

Površine presjeka moramo izračunati kako bismo dobili brzinu strujanja fluida kroz zadani promjer turbostroja.

$$A = \frac{d^2 \times \pi}{4} \quad (6.10)$$

Gdje je:

$A$  – površina kružnog presjeka ( $\text{m}^2$ )

$d$  – promjer cjevovoda (m)

Površine presjeka za protoke od  $4.4 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $Q = 2.2 \text{ m}^3/\text{s}$ ) i  $6.6 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $Q = 3.3 \text{ m}^3/\text{s}$ ), prema zadanoj formuli, izračunali smo površine promjera turbostroja i rezultate unijeli u tablicu.

### 6.3.7. Brzine strujanja kroz turbostroj

$$v = \frac{Q}{A}$$

Brzine strujanja za protoke od  $4.4 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $Q = 2.2 \text{ m}^3/\text{s}$ ) i  $6.6 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $Q = 3.3 \text{ m}^3/\text{s}$ ), prema zadanoj formuli, izračunali smo brzine strujanja kroz turbostroj i rezultate unijeli u tablicu.

### 6.3.8. Izračun snaga i usporedba

Izračunamo snagu nove hidroelektrane i usporedimo ju sa snagama HE Zeleni Vir i HE Curak.

Snagu koju turbina preuzima na ulazu u spiralni kanal računamo sljedećom formulom:

$$P_u = \rho \times g \times Q \times H = 9.81 \times Q \times H_n \quad (6.11)$$

Snagu koju turbina predaje generatoru računamo sljedećom formulom:

$$P_t = P_u \times \eta_t = 9.81 \times Q \times H_n \times \eta_t \quad (6.12)$$

Gdje je:

$P_u$  – snaga vodnog toka na ulazu u spiralni kanal ili na ulazu u mlaznicu (kW)

$P_t$  – snaga turbine (kW)

$\rho$  – gustoća vode (1000 kg/m<sup>3</sup>)

$g$  – gravitacija (m/s<sup>2</sup>)

$H_n$  – neto pad (m)

$Q$  – protok (m<sup>3</sup>/s)

$\eta_t$  – stupanj djelovanja turbine

Izračunamo snagu HE Zeleni Vir za  $Q = 6.6 \text{ m}^3/\text{s}$ :

$$P_u = 9.81 \times Q \times H_n = 9.81 \times 6.6 \times 48.8046 = 3159.9026 \text{ kW}$$

$$P_t = P_u \times \eta_t = 3159.9026 \times 0.79 = 2496.3231 \text{ kW}$$

Izračunamo snagu HE Curak za  $Q = 6.6 \text{ m}^3/\text{s}$ :

$$P_u = 9.81 \times Q \times H_n = 9.81 \times 6.6 \times 13.5 = 875 \text{ kW}$$

$$P_t = P_u \times \eta_t = 875 \times 0.93 = 814 \text{ kW}$$

Izračunamo snagu nove hidroelektrane za oba protoka uz pretpostavku da će nam stupanj iskorištenja iznositi 89%:

Za  $Q = 4.4 \text{ m}^3/\text{s}$ :

$$P_u = 9.81 \times Q \times H_n = 9.81 \times 4.4 \times 73.617 = 3177.6042 \text{ kW}$$

$$P_t = P_u \times \eta_t = 3177.6042 \times 0.89 = 2828.0677 \text{ kW}$$

Za  $Q = 6.6 \text{ m}^3/\text{s}$ :

$$P_u = 9.81 \times Q \times H_n = 9.81 \times 6.6 \times 69.8968 = 4525.5382 \text{ kW}$$

$$P_t = P_u \times \eta_t = 4525.5382 \times 0.89 = 4027.729 \text{ kW}$$

### 6.3.9. Rezultati

Dobiveni rezultati brzohodnosti, bezdimenzijskih značajki, promjera turbostrojeva, površina i brzina, za oba protoka od  $4.4 \text{ m}^3/\text{s}$  i  $6.6 \text{ m}^3/\text{s}$ , upisani su u tablice 6.3. i 6.4. te su zelenom bojom označene vrijednosti turbostrojeva koje bi izveli unutar nove hidroelektrane. Na temelju proračuna za već instalirani protok od  $4.4 \text{ m}^3/\text{s}$  najbolje bi odgovarala 2 turbostroja koja bi najveći stupanj iskoristivosti imala pri 500 okr/min i promjeru od 0.528 m. Kod 50% većeg protoka od  $6.6 \text{ m}^3/\text{s}$  najbolje bi odgovarala 2 turbostroja koja bi najveći stupanj iskorištenja imala pri 428.5714 okr/min i promjeru od 0.643 m. To smo odredili na temelju nekih „normalnih“ ,odnosno „maksimalnih“ brzina na ulazu u spiralu koje uglavnom iznose između  $10$  i  $11 \text{ m}^3/\text{s}$ .

S obzirom na sličnost omjera  $\sigma$  i  $\delta$  sa HE Rijeka uzeli smo njihov presjek Francis turbine koje bi se izvele u novu hidroelektranu te ih u CAD-u preskalirali na geometriju dobivenu proračunom. U CAD-u je izrađen poprečni presjek strojarnice nove hidroelektrane u koju bi dobiveni turbostrojevi bili izvedeni. CAD crteži presjeka turbine i presjeka strojarnice priloženi su uz završni rad.

okr/min	$nq$	$\sigma$	$\delta$	$d(m)$	$A(m^2)$	$v(m/s)$
3000	177,0513	1,1207	1,40	0,2688	0,0567	38,7877
1500	88,5256	0,5604	1,68	0,3226	0,0817	26,9293
1000	59,0171	0,3736	2,05	0,3936	0,1216	18,0902
750	44,2628	0,2802	2,30	0,4416	0,1531	14,3713
600	35,4103	0,2241	2,59	0,4973	0,1941	11,3322
500	29,5085	0,1868	2,75	0,528	0,2188	10,0528
428,5714	25,2930	0,1601	3,05	0,5857	0,2693	8,1696
375	22,1314	0,1401	3,20	0,6145	0,2964	7,4218
333,3333	19,6724	0,1245	/	/	/	/
300	17,7051	0,1121	/	/	/	/
272,7272	16,0956	0,1019	/	/	/	/
250	14,7543	0,0934	/	/	/	/

Tablica 6. 3. Prikaz svih vrijednosti za  $Q = 4.4 \text{ m}^3/s$ 

okr/min	$nq$	$\sigma$	$\delta$	$d(m)$	$A(m^2)$	$v(m/s)$
3000	225,4422	1,4270	1,32	0,3145	0,0776	42,5014
1500	112,7211	0,7135	1,56	0,3717	0,1085	30,4270
1000	75,1474	0,4757	1,85	0,4407	0,1525	21,6450
750	56,3606	0,3568	2,19	0,5217	0,2137	15,4455
600	45,0884	0,2854	2,3	0,548	0,2357	13,9986
500	37,5737	0,2378	2,5	0,5956	0,2785	11,8505
428,5714	32,2060	0,2039	2,7	0,6433	0,3249	10,1582
375	28,1803	0,1784	2,98	0,71	0,3957	8,3393
333,3333	25,0491	0,1586	3,11	0,7409	0,4309	7,6582
300	22,5442	0,1427	3,20	0,7624	0,4563	7,2323
272,7272	20,4947	0,1297	/	/	/	/
250	18,7869	0,1189	/	/	/	/

Tablica 6. 4. Prikaz svih vrijednosti za  $Q = 6.6 \text{ m}^3/s$

## 7. ZAKLJUČAK

U ovom završnom radu detaljnije su analizirana postrojenja HE Zeleni Vir i HE Curak. Dugoročni plan je zamjena ta dva postrojenja jednim postrojenjem. Iz tog razloga prvo su detaljnije opisane karakteristike postojećih hidroelektrana kako bismo dobili bolji uvid u situaciju s kojom se susrećemo. Zatim se izvršio proračun gubitaka za pojedine komponente sustava. Na temelju dobivenih gubitaka izračunali smo neto pad tako da smo od bruto pada oduzeli iste. Zatim su uzeti različiti brojevi okretaja preko kojih smo računali brzohodnosti, bezdimenzijske značajke pomoći Cordierovog dijagrama te naposljetku promjeri turbostrojeva koji bi bili izvedeni unutar novog postrojenja.

Iz rezultata završnog rada možemo izvući zaključke da bismo zamjenom već postojećeg postrojenja, tj. zamjenom HE Zeleni Vir i HE Curak novom hidroelektranom koja bi se nalazila na kraju cjevovoda, dobili 15-20% veću snagu kod već instaliranog protoka od  $4.4 \text{ m}^3/\text{s}$  i kod protoka od  $6.6 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Detaljnijim ispitivanjima i analizama iz odnosa snaga i protoka mogli bismo bolje odrediti stupanj iskorištenja turbine radi bolje izvedbe turbine u svrhu povećanja snage. CAD model presjeka Francis turbine uzete iz HE Rijeka, koja je podešena na dobivenu geometriju, realno prikazuje turbine koje bi se mogle izvesti u novu hidroelektranu. CAD model nacrtu strojarnice prikazuje novu teoretsku strojarnicu koja bi zamijenila HE Zeleni Vir i HE Curak unutar koje bi izveli 2 turbostroja sa dobivenim vrijednostima.

## 8. SAŽETAK

Zadatak rada izvršen je u nekoliko koraka. Prvo su detaljnije opisane hidroelektrane Zeleni Vir i Curak nakon čega su izračunati gubici u sustavu tlačnih cjevovoda i dovodnih tunela a zatim bruto i neto pad sustava. Uzeto je više različitih brojeva okretaja u minuti i na temelju njih izračunate su brzohodnost, bezdimenzijske značajke, promjere turbostrojeva, presjeke promjera i brzine strujanja kroz turbostroj. Iz dobivenih rezultata uzet je nama najpovoljniji slučaj za novu hidroelektranu koja bi bila izvedena.

**Ključne riječi:** vodna energija, hidroenergetski sustav, hidraulički gubici, odabir turbostroja



## **9. ABSTRACT**

The task was done in a few steps. First, the Zeleni Vir and Curak hydroelectric power plants are described in detail after which we have calculated losses within system of supply channels and penstocks which we used to calculate gross and net falls in the system. Then we took multiple revolutions per minute by means of which we have calculated dimensionless specific speed of rotation, dimensionless features, diameters of turbomachines, diameter sections and flow speeds through turbomachines. From the obtained results we took the most optimized example for the new hydroelectric power plant that would be implemented.

**Key words:** water energy, hydropower system, hydraulic losses, turbomachine choosing

## LITERATURA

- [1] SEH, Savez energetičara Hrvatske, Croatian energy management association, VODNE TURBINE Rijeka, 2012.
- [2] DEI, društvo energetičara „Istra“, PULA, Mutilska 17, MJERENJA, REGULACIJE I UPRAVLJANJE PROCESIMA (Skripta za pripremu stručnog ispita energetičara), Pula 2013.
- [3] HEP, PP „ZAPAD“, POGON HE VINODOL – dio u Gorskom kotaru, elektrotehnika, električna postrojenja, relejna zaštita, strojarska postrojenja, priručnik za uklopničare i strojare hidroturbina, Travanj, 2002. god.
- [4] V:3/5/2019, Hidraulički strojevi, Dio predavanja kolegija, HIDRAULIČKI STROJEVI, Zoran Čarija, 2010. god.
- [5] HE Zeleni Vir, <https://www.hep.hr/proizvodnja/hidroelektrane-1528/pp-he-zapad/he-zeleni-vir/1539>
- [6] Mala hidroelektrana Zeleni Vir, [https://hr.wikipedia.org/wiki/Mala\\_hidroelektrana\\_Zeleni\\_vir](https://hr.wikipedia.org/wiki/Mala_hidroelektrana_Zeleni_vir)
- [7] Poslovni dnevnik, HE Zeleni Vir, <https://www.poslovni.hr/domace/hidroelektrana-zeleni-vir-ove-godine-slavi-stotu-obljetnicu-4322002>
- [8] Croinfo HE Zeleni Vir, <http://www.croinfo.net/croinfo2012/vijesti-regija/6770-hidroelektrana-zeleni-vir-munjara-iz-1921-g.html>
- [9] ELABORAT ZAŠTITE OKOLIŠA, u postupku ocjene o potrebi procjene utjecaja na okoliš za zahvat, rekonstrukcija hidroelektrane Zeleni Vir, [https://mingor.gov.hr/UserDocsImages/ARHIVA%20DOKUMENATA/ARHIVA%20---%20OPUO/2015/elaborat\\_zastite\\_okolisa\\_480.pdf](https://mingor.gov.hr/UserDocsImages/ARHIVA%20DOKUMENATA/ARHIVA%20---%20OPUO/2015/elaborat_zastite_okolisa_480.pdf)
- [10] Vodne turbine, radni materijal predavanje kolegija Hidraulički strojevi, Dr.sc. Zoran Čarija, dipl. ing.
- [11] Kruženje vode u prirodi, <https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/c22bacc6-4a87-450d-9dc0-2acf43ade625/biologija-7/m06/j03/index.html>
- [12] Hydropower explained, <https://www.eia.gov/energyexplained/hydropower/>

- [13] Hydropower and fishing [https://www.researchgate.net/figure/Run-of-river-Diversion-type-of-hydropower-plant-Source-US-DoE-Reservoir-Storage\\_fig3\\_370079446](https://www.researchgate.net/figure/Run-of-river-Diversion-type-of-hydropower-plant-Source-US-DoE-Reservoir-Storage_fig3_370079446)

## POPIS SLIKA

Slika 2. 1. Ciklus kruženja vode u prirodi [11].....	8
Slika 2. 2. Preusmjeravanje vodenog toka [13].....	9
Slika 3. 1. Shema hidroelektrane [12].....	13
Slika 3. 2. Primjer nasute i masivne brane [3].....	14
Slika 3. 3. Primjer pozicije preljeva i obilazan tunel kod nasute brane [3].....	15
Slika 3. 4. Primjer zahvata [3].....	16
Slika 3. 5. Primjer vodne komore [10].....	17
Slika 4. 1. Pregledna situacija postrojenja Zeleni Vir.....	20
Slika 4. 2. Hidroelektrana Zeleni Vir.....	21
Slika 4. 3. Vodena pregrada sa zahvatom na izvoru.....	22
Slika 4. 4. Unutrašnjost dovodnog tunela [9].....	23
Slika 4. 5. Šetnica prema izvoru koja prekriva dovodni tunel.....	24
Slika 4. 6. Vodna komora.....	25
Slika 4. 7. Tlačni cjevovod.....	26
Slika 4. 8. Tlocrt strojarnice.....	27
Slika 4. 9. Poprečni presjek strojarnice.....	28
Slika 4. 10. Unutrašnjost strojarnice [9].....	28
Slika 4. 11. Odvodni tunel.....	29
Slika 5. 1. HE Curak.....	30
Slika 5. 2. Dijelovi cjevovoda HE Curak.....	31
Slika 5. 3. Unutrašnjost strojarnice.....	32
Slika 5. 4. Odvodni kanal.....	33

Slika 6. 1. Model postojećeg postrojenja podijeljen na segmente.....	34
Slika 6. 2. Model postrojenja sa novom elektranom.....	34
Slika 6. 3. Shematski primjer računanja bruto pada.....	41
Slika 6. 4. Primjer Cordierovog dijagrama.....	46

**POPIS TABLICA**

Tablica 6. 1. Veza $\sigma$ i $\delta$ za $Q = 4.4 \text{ m}^3/\text{s}$ .....	47
Tablica 6. 2. Veza $\sigma$ i $\delta$ za $Q = 6.6 \text{ m}^3/\text{s}$ .....	47
Tablica 6. 3. Prikaz svih vrijednosti za $Q = 4.4 \text{ m}^3/\text{s}$ .....	53
Tablica 6. 4. Prikaz svih vrijednosti za $Q = 6.6 \text{ m}^3/\text{s}$ .....	53

## **PRILOZI**

Nacrt 1 Presjek Francis turbine sa dobivenom geometrijom

Nacrt 2 Crtež strojnice nove hidroelektrane