# Tlačni tunel HE i utjecaji na generator

**Ilakovac, Danijel**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2017**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:927258

*Rights / Prava:* In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-03-29**

*Repository / Repozitorij:*

Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek

zir.nsk.hr

Image not found or type unknown

**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU**
**ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET**

**Sveučilišni studij**

# TLAČNI TUNEL HE I UTJECAJI NA GENERATOR

**Diplomski rad**

**Danijel Ilakovac**

**Osijek, 2017.**

ETFOS
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET OSIJEK
Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku

**Obrazac D1: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za obranu diplomskog rada**

**Osiiek.**

**Odboru za završne i diplomske ispite**

**Imenovanje Povjerenstva za obranu diplomskog rada**

| | |
|---|---|
| **Ime i prezime studenta:** | Danijel Ilakovac |
| **Studij, smjer:** | Elektrotehnika-Elektroenergetika |
| **Mat. br. studenta, godina** | D859, 2014 |
| **Mentor:** | Marinko Stojkov |
| **Sumentor:** | - |
| **Predsjednik Povjerenstva:** | Damir Šljivac |
| **Član Povjerenstva:** | Zvonimir Klaić |
| **Naslov diplomskog rada:** | Tlačni tunel HE i utjecaji na generator |
| **Primarna znanstvena grana rada:** | Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnike) |
| **Sekundarna znanstvena grana (ili polje) rada:** | - |
| **Zadatak diplomskog rada:** | Opis normalnog pogona, Fizikalni model tlačnog vala pri zatvaranju zasuna; Maksimalni tlak vode; Utjecaj na različite vrste vodnih turbina; Regulator tlaka; Utjecaj na generator. |
| **Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (diplomskog** | Vrlo dobar (4) |
| **Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i** | Primjena znanja stečenih na fakultetu:2<br>Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka:2<br>Jasnoća pismenog izražavanja:2 |

Potpis sumentora: Potpis mentora:

Dostaviti:

1. Studentska služba

U Osijeku, godine

Potpis predsjednika Odbora:

Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku

ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET OSIJEK

**IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA**

**Osijek,**

| | |
|---|---|
| **Ime i prezime studenta:** | Danijel Ilakovac |
| **Studij** : | Diplomski studij elektroenergetike |
| **Mat. br. studenta, godina upisa:** | D859, 2014 |

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom**:**

**Tlačni tunel HE i utjecaji na generator**

izrađen pod vodstvom mentora

**prof.dr.sc. Marinko Stojkov**

i sumentora

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.

Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

# SADRŽAJ:

1. UVOD ..... 1
2. HIDROELEKTRANE ..... 2
2.1.Povijest hidroelektrane ..... 2
2.2.Opis hidroelektrane ..... 2
2.3.Podjela hidroelektrana ..... 6
3. UTJECAJI NA RAZLIČITE VRSTE VODNIH TURBINA ..... 13
3.1. Vodna turbina ..... 13
3.2. Podjela vodnih turbina ..... 14
4. UTJECAJ GENERATORA I REGULATOR TLAKA ..... 18
5. FIZIKALNI MODEL TLAČNOG VALA PRI ZATVARANJU ZASUNA ..... 21
6. OPIS MALE PROTOČNE HIDROELEKTRANE NA RIJECI KRUPA ..... 25
ZAKLJUČAK ..... 39
POPIS UPOTRIJEBLJENE LITERATURE ..... 39
SAŽETAK ..... 42
ŽIVOTOPIS ..... 43

# 1. UVOD

Utjecaj elektrana na okoliš danas je bitan element planiranja, razvoja i pogona elektroenergetskog sustava i stoga nezaobilazan predmet u studiju elektroenergetike. Električna energija jedna je od najčišćih energija današnjice, međutim energija vode odnosno hidroenergija je energija koja je najraširenija i koja čini najznačajniji obnovljivi izvor energije, a ujedno i jedina koji je ekonomski konkurentna fosilnim gorivima i nuklearnoj energiji. Obzirom da je danas hidroenergija jako dobro iskorištena, hidroelektrane su postale prvi izvor električne energije. Iako postoje mnoge prednosti hidroelektrana svakako je potrebno navesti one koje su i najznačajnije a to su eliminacija troškova goriva, dugotrajnost rada i komparativna ekološka prednost - smanjen utjecaj na okoliš. Oko 20 % ukupne električne energije proizvedene u svijetu dobiva se upravo iz hidroelektrana dok je u nekim državama svijeta to prevladavajući način proizvodnje električne energije kao primjerice u Norveškoj koja dobiva čak oko 98% svoje energije iz hidroelektrana. U Republici Hrvatskoj ukupni potencijal vodnih snaga procjenjuje se na 20TWh godišnje no međutim od istog potencijala iskoristivo je oko 12 TWh . U usporedbi s Austrijom, mali broj malih hidroelektrana je u pogonu. Nažalost, iako se proizvodnja u hidroelektranama povećava i brzo raste, unatoč niskoj cijeni očito je da još nije dosegla razinu proizvodnje kao što je to u nuklearnim elektranama ili termoelektranama.

Kroz ovaj diplomski rad opisati ću rad hidroelektrane, opis normalnog pogona, zatim fizikalnog modela tlačnog vala pri zatvaranju zasuna, maksimalni tlak vode, utjecaj na različite vrste turbina, regulator tlaka te utjecaj na generator.

# 2. HIDROELEKTRANE

## 2.1. Povijest hidroelektrane

Kada govorimo o počecima hidroelektrana odnosno o njihovom pojavljivanju i korištenju, može se reći da je korištenje hidroenergije započelo u Mezopotamiji i drvenom Egiptu prije 8000 godina kada se ona koristila isključivo za navodnjavanje. Hidroenergija se za rudarstvo koristila i u Rimskom carstvu dok se snaga vode u Indiji koristila za dobivanje mehaničkog rada u vodenicama koje su pokretale mlinove, preše, kovačnice, pilane i razne druge pogone, a od posljednjih desetljeća 19. stoljeća koristi se i za dobivanje električne energije obzirom da su krajem 19. stoljeća razvijeni prvi električni generatori koji su preteča prvih hidroelektrana. 1876. godine u Bavarskoj izgrađena je prva hidroelektrana na svijetu koja je služila za opskrbu obližnjeg velikaškog dvorca električnom energijom, [1]. Prva javna hidroelektrana imala je snagu od 130 kW, a nalazila se u Švedskoj gdje je sagrađena 1883. godine. Valja napomenuti da je najpoznatiju hidroelektranu na svijetu koja se nalazi na slapovima Niagare dizajnirao Nikola Tesla. Danas, u 21. stoljeću, snaga najvećih hidroelektrana prelazi snagu od 4000 MW, a voda se koristi na padovima od nekoliko metara do nekoliko tisuća metara.

## 2.2. Opis hidroelektrane

U hidroelektrani osnovni izvor energije je potencijalna energija vode koja se pretvara u kinetičku energiju vode i dovodi kroz kanale, odnosno cjevovode do turbine. Kinetička energija vode u pokretu se rotacijom turbine pretvara u mehaničku energiju. Mehanička energija rotirajuće turbine se pretvara u električnu energiju u generatoru s kojim je mehanički povezana osovinom. Sva proizvedena električna energija se predaje u elektrodistribucijsku mrežu.

Hidroelektrane gradimo kao kaskade na rijekama s odgovarajućim padom, ili pri branama, koje zadržavaju vodu rijeka i puštaju je prema potrebi u reguliranoj količini. Vodna brana je ne samo energetski izvor već ograničava poplave, čini rijeku plovnom za lađe, opskrbljuje vodom poljoprivredna gospodarstva, šume i industriju, [2]. Još se od davnih vremena snaga vode koristila za dobivanje mehaničkog rada u vodenicama koje su pokretale mlinove, preše, kovačnice, pilane i razne druge pogone, a od posljednjih desetljeća 19. stoljeća koristi se i za dobivanje električne

energije. Prva hidroelektrana na svijetu izgrađena je 1876. godine u Bavarskoj i služila je za opskrbu obližnjeg velikaškog dvorca električnom energijom, [3].




Sl. 2.1. Hidroelektrane u Republici Hrvatskoj [4]

U hidroelektranama se ostvaruje vrlo visok stupanj djelovanja i do 94 posto energije vode preobrazi se u električnu energiju, dakako pri optimalnom opterećenju. Stupanj djelovanja varira i s variranjem pada vode, dakle s promjenom razine gornje vode mijenja se i stupanj djelovanja.

U hidroelektranama se potencijalna energija vode posredno preobražava pomoću vodnih turbina i generatora u električnu energiju. Kako bi se omogućilo korištenje potencijalnom energijom vode, ona mora na ulazu u hidroelektranu biti na barem nešto višoj razini od razine vode na izlazu iz hidroelektrane, no, koristi se i voda čija gornja razina i više stotina, pa čak i preko tisuću metara nadvisuje razinu vode na izlazu.

Snaga hidroelektrane izravno je proporcionalna toj razlici ulazne i izlazne vode:

$$P = 9.81 \cdot Q \cdot h \cdot \eta \tag{2-1}$$

gdje oznaka $P$ predstavlja snagu hidroelektrane u kilovatima, oznaka $Q$ protok vode u $m^3/s$, oznaka $h$ predstavlja visinsku razliku gornje i donje razine vode u metrima i oznaka $\eta$ predstavlja ukupni stupanj djelovanja hidroelektrane.

Prema slici 2.2. sastavni (karakteristični) dijelovi hidroelektrane su:

- brana ili pregrada,
- zahvat vode,
- dovod vode,
- vodna komora ili vodostan,
- tlačni cjevovod,
- strojarnica,
- odvod vode.

**Brana** ili **pregrada** je dio hidroelektrane koji služi da s prirodnog toka skrene vodu prema zahvatu hidroelektrane, njome se ostvaruje akumulacija te dovodi do povećanja razine vode radi većeg pada.

Osnovnu podjelu brana čine visoke i niske brane. Visoke brane su one čija visina od temelja do krune je veća od 15 metara ili visina veća od 10 metara, ali s krunom dužom od 500 metara (najstarija poznata brana visine 15 metara je izgrađena od opeke na rijeci Nilu 2900 godina prije Krista). Sve ostale brane su niske brane.

S obzirom na materijal od koji se grade, brane možemo podijeliti na masivne i nasute. Masivne brane grade se od kamena i armiranog betona, a nasute od prirodnih materijala ili od homogenih ili nehomogenih materijala.

Valja spomenuti i podjelu masivnih brana prema konstrukciji, a to su: gravitacijske, lučne i raščlanjene.

**Zahvat vode** prima vodu zaustavljenu od brane i usmjerava ju prema turbinama. S obzirom na tipove zahvata vode, razlikujemo zahvat na površini koji se koristi kod niskih brana i zahvat ispod površine vode koji se koristi kod visokih brana gdje nivo vode nije konstantan.

**Dovod vode** je građevina koja se gradi kao tunel ili kanal spajajući naprijed opisan zahvat s vodnom komorom (vodostan). Ovisno o tlu i pogonu tunel se gradi ili kao gravitacijski ili kao tlačni. Gravitacijski tunel nije ispunjen vodom te je za promjenu dotjecanja vode potrebno mijenjati otvor na zahvatu, a tlačni tunel je ispunjen vodom po cijeloj svojoj dužini te nije potrebno djelovanje na zahvatu.

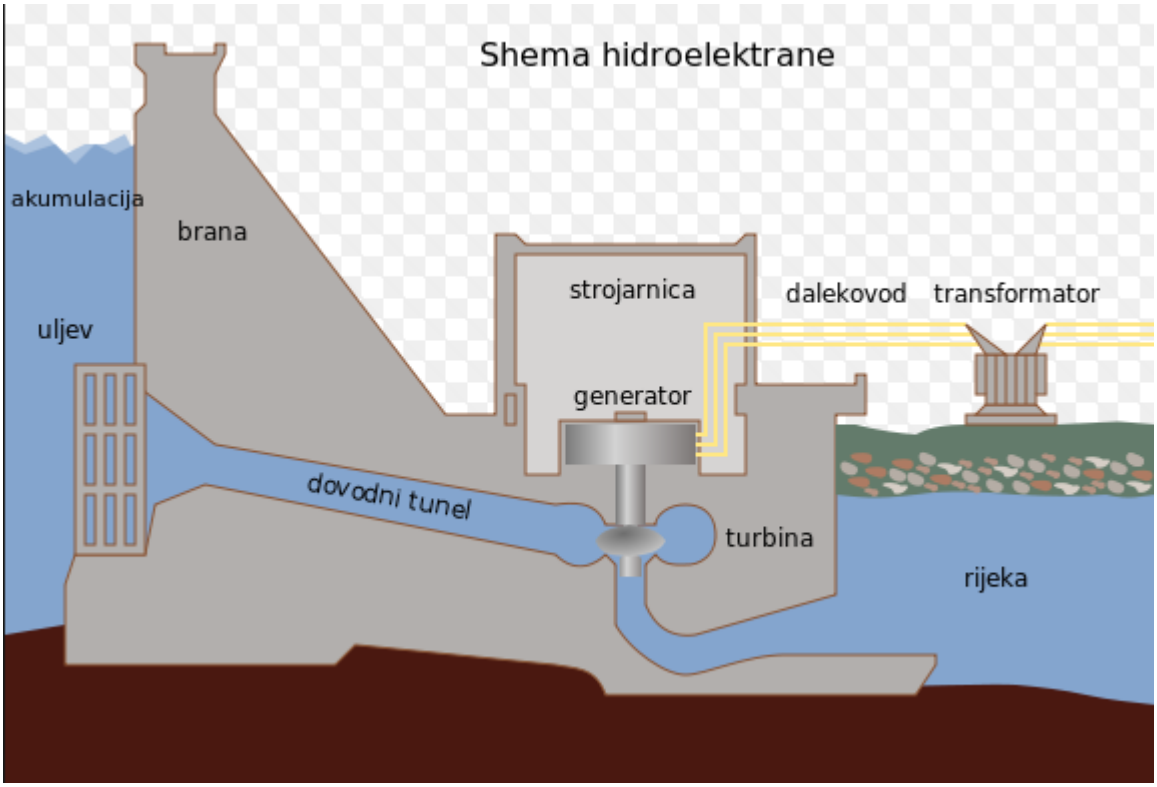
**Vodena komora** ili **vodostan** postavljena je na zadnjem dijelu dovoda, služi za odgovaranje na promjene opterećenja, a razlikujemo dva slučaja. Ako je dovod gravitacijski tada vodna komora služi kao spremnik vode radi ublažavanja posljedica naglih promjena opterećenja. Ukoliko je dovod tlačni tada se vodena komora može graditi kao proširenje na kraju istog dovoda prilagođenih dimenzija tako da se promjenom opterećenja tlak u dovodu ne poveća iznad granica koje su dopuštene. Cilj gradnje vodene komore kao proširenje na dovodu je taj da se razina vode ne spusti ispod najviše točke ulaza u tlačni cjevovod.

**Tlačni cjevovod** se gradi kao čelični ili od betona sa zadatkom da vodu koja proizlazi iz vodene komore usmjeri ka turbini, a s obzirom na smještaj može biti na površini ili tunelu. Na početku tlačnog cjevovoda nalazi se zaporni organ. Osim pomoćnog zapornog organa najvažniju ulogu ima sigurnosni zaporni organ kojemu je u slučaju puknuća cijevi zadatak sprječavanje daljnjeg protjecanja vode u cjevovod. Čelični ili nadzemni cjevovodi izvode se iznad tla, fiksiraju se na čvrstim točkama i oslanjanju se na sedla. Koriste se za dionice s velikim tlakovima, proizvode se u duljinama od 4-12 m, za tlakove 10, 15, 25, 40, 60, 80 i 100 bara. Armirano – betonski cjevovodi koriste se za manje tlakove i veće protoke (najviše do 30 bara).

Promjenom brzine vode na jednom kraju cjevovoda može doći i do nagle i bitne promjene tlaka što dovodi do nastanka vodnog udara**. Vodni (hidraulički) udar** se događa pretežno pod utjecajem sila inercije i sila elastičnosti. U tlačnom cjevovodu su vrlo velike brzine širenja promjene tlaka, za cjevovode izgrađene od čelika su reda veličine 1000 m/s. Povećanje tlaka na zatvaraču zbog efekta vodnog udara može postići vrijednost nekoliko desetaka bara. Povećanje tlaka zbog vodenog udara slijedi pojava buke i vibracije cijevi.

**Strojarnica** je građevina u kojoj se nalaze turbine, vratila, generatori te ostali upravljački i pomoćni uređaji. U strojarnici se potencijalna energija vode prvo pretvara u kinetičku energiju njenog strujanja, a zatim uslijed vrtnje vratila vodne turbine u mehaničku energiju, u konačnici u električnom generatoru u električnu energiju. Prema smještaju strojarnice hidroelektrane možemo podijeliti na nadzemne i podzemne.

**Odvod vode** služi za povrat vode koja je iskorištena u turbini nazad u korito vodotoka ili za odvod vode prema zahvatu sljedeće elektrane. Izvodi se kao tunel za odvod vode u podzemnim strojarnicama ili kao kanal za odvod vode u nadzemnim strojarnicama.




Sl. 2.2. Karakteristični dijelovi hidroelektrane [5]

## 2.3. Podjela hidroelektrana

Hidroelektrane se dijele s obzirom na način korištenja vode, prema visini pada, prema načinu punjenja akumulacijskog bazena, prema smještaju strojarnice te posebne vrste akumulacijskih hidroelektrana.

Hidroelektrane s obzirom na način korištenja vode se dijele na:

1. Protočne hidroelektrane

2. Akumulacijske hidroelektrane

**Protočna hidroelektrana** locira se na način da se zaustavi tok određene rijeke, što donekle podigne razinu gornje vode i time omogućuje funkcioniranje vodne turbine smještene u podnožje

brane na rijeci, ili u posebno izgrađen privodni kanal za hidroelektranu. Karakteristično za taj tip hidroelektrane da njezina trenutna proizvodnja (dakle njezina raspoloživa snaga) ovisi o prirodnom dotoku vode rijekom, uz neznatna prilagođavanja te proizvodnje potražnji električne energije u elektroenergetskom sustavu u kojem radi ta hidroelektrana. Zbog potrebnog uređenja uzvodnog zaobalja rijeke, protočna hidroelektrana svojom izgradnjom može poboljšati prilike u riječnoj plovidbi, navodnjavanju poljoprivrednih površina, može poboljšati turističku ponudu kraja u kojem je izgrađena, te vodoopskrbu, [6]. Protočne turbine pogodne su za mali pad i male količine vode, što rezultira i malim učinkom. U ovom slučaju voda tangencijalno protječe kroz rotor. Zapreka je daljnjem razvoju velikih hidroelektrana donekle i zaštita okoliša, jer one znače veliki zahvat u ekosustav tih voda. Zato se revitalizacija i moderniziranje postojećih postrojenja neusporedivo manji zahvat u ekosustav od gradnje novih. Ekološke mjere (kao što su npr. ubrzavanje razvoja ribljih vrsta) i održavanje minimalnog protoka vode znače maksimalno smanjeni utjecaj na okoliš, [7].

**Akumulacijske hidroelektrane** podižu se na mjestima na kojima postoji mogućnost akumuliranja vode u umjetno uspostavljenom jezeru tako da je razina vode u tom jezeru iznad razine neke moguće odvodnje te vode iz elektrane, dosta često je to razina mora, kamo ta voda i inače-prirodnim putem dospijeva. Za stvaranje umjetnog jezera podiže se brana, često vrlo velike visine i volumena ugrađenog materijala. Hidroelektrana se smješta na razini donje vode, a između nje i akumulacijskog jezera postavlja se tlačni cjevovod uz eventualni gravitacijski kanal za dovod vode elektrani ili je izvedena kao pribranska elektrana, smještena uz najdonji dio brane. U akumulacijskom jezeru prikuplja se voda svojim prirodnim dotokom, te oborinska voda iz šireg područja jezera. Korištenje akumuliranom vodom nije povezano s punjenjem akumulacijskog bazena, naravno sve do tada dok bazen nije do vrha pun, nego je korištenje vezano uz dnevni, tjedni, sezonski pa čak i višegodišnji ritam pažljivo planirane proizvodnje električne energije. Voda se koristi, bazen se prazni, u doba vršnih opterećenja elektroenergetskog sustava, a elektrana može mirovati u doba malih opterećenja omogućujući opet stanovito punjenje akumulacijskog bazena. Angažirana snaga može uvijek biti jednaka nazivnoj snazi (pri zatečenom padu vode), ali proizvodnja tom snagom je ograničena brzinom pražnjenja akumulacije. Kako pad vode, razlika između razina gornje i donje vode može iznositi i više stotina metara, a korisni volumen akumulacijskog jezera i više milijuna kubnih metara , to osobito snage a i moguće godišnje proizvodnje akumulacijskih hidroelektrana mogu biti vrlo velike. Drugo dobro svojstvo tih

elektrana već je spomenuto: velika regulacijska sposobnost takve elektrane, odnosno sposobnost da u vrlo kratkom vremenu prilagođava svoje opterećenje čak iznenada nastalim potrebama elektroenergetskog sustava, [8].

Hidroelektrane prema visini pada dijele se kako slijedi.

**Niskotlačne hidroelektrane** - kod niskotlačnih hidroelektrana visina pada doseže do 25 metara, a za takve padove najčešće se koriste Kaplanove turbine. Iste hidroelektrane najčešće se upotrebljavaju kao protočne hidroelektrane za pokrivanje osnovnog opterećenja te u većini slučajeva nemaju mogućnost akumuliranja vode. Specifičnost takvih hidroelektrana je da se grade u svojstvu riječnih i kanalnih postrojenja za padove do 1m/km, a cjelokupan pad im stoji na raspolaganju neposredno kod elektrane, bez potrebe za tlačnim dovodima i cjevovodima.

Za razliku od niskotlačnih hidroelektrana cjelokupan pad **srednjetlačne hidroelektrane** nije neposredno uz elektranu. Visina pada kod srednjetlačne hidroelektrane doseže od 25 do 200 metara te se za iste koriste Francisove turbine, a od visokotlačne hidroelektrane razlikuju se po kraćem tlačnom cjevovodu te mjestu izgradnje. Navedene elektrane grade se najčešće na mjestima gdje rijeka stvara zavoj odnosno koji se tada presječe cjevovodom ili kanalom.

Za **visokotlačne hidroelektrane** primjenjuju se Peltonove turbine, a takve hidroelektrane imaju najveću visinu pada koja ide od 200 metara na više te je za njih karakteristično da se grade u brdovitim krajevima. U najviše slučajeva su derivacijske, a zahvat i strojarnica se nalaze na odvojenim mjestima jer se voda iz akumulacijskog bazena dovodi do turbina cjevovodom dugačkim i više kilometara.

Hidroelektrane se prema načinu punjenja akumulacijskog bazena se dijele na:

- hidroelektrane s dnevnom akumulacijom (punjenje akumulacije noću, a pražnjenje danju),
- hidroelektrane sa sezonskom akumulacijom (punjenje akumulacije u kišnom, a pražnjenje u sušnom razdoblju) i
- hidroelektrane s godišnjom akumulacijom (punjenje akumulacije u kišnim, a pražnjenje u sušnim godinama).

Prema smještaju strojarnice hidroelektrane se dijele na pribranske i derivacijske. **Pribranske** akumulacijske hidroelektrane su one kod koje se strojarnica za proizvodnju nalazi u samoj pregradnoj brani, dok je kod **derivacijskih strojarnica** za proizvodnju energije izmještena na

nekoj udaljenosti (nizvodno od brane), a voda se iz akumulacijskog jezera dovodi posebnim cijevima sa zahvata do strojarnice. U Hrvatskoj najveću raspoloživu snagu od 486 MW ima derivacijska akumulacijska hidroelektrana Zakučac kraj Omiša (isporučuje oko jednu trećinu ukupne hidroenergije u Hrvatskoj) u s prosječnom proizvodnjom od 1441 GWh, dok jedna od pribranskih akumulacijskih hidroelektrana je HE Lešće (prva izgrađena u Hrvatskoj od samostalnosti države) na <donjem toku rijeke Dobre s raspoloživom snagom od 42,29 MW i prosječnom proizvodnjom od 31 GWh.

Osim naprijed navedenih, razlikujemo i posebne vrste akumulacijskih hidroelektrana, a to su:

- crpno – akumulacijske (reverzibilne) hidroelektrane i
- hidroelektrane na plimu i oseku

**Crpno-akumulacijska hidroelektrana** (u literaturi se koristi i naziv reverzibilna hidroelektrana) (sl.2.3.), zapravo je akumulacijska hidroelektrana koja se može koristiti u turbinskom i crpnom radu. S obzirom na navedeno kada je potrebna njezina proizvodnja, tj. kada se pojavi velika potražnja električne energije tada se koristi u turbinskom, generatorskom radu, a u razdobljima male potražnje električne energije u elektroenergetskom sustavu koristi se u crpnom, motorskom radu. Kako je na tržištu električne energije cijena energije u doba male potražnje niža, a doba velike potražnje viša, to crpno - akumulacijska hidroelektrana ostvaruje - pored energetske - i novčanu dobit za elektroenergetski sustav u koji je ugrađena, [9]. Jedna od najpoznatijih reverzibilnih hidroelektrana u Hrvatskoj je hidroelektrana Velebit koja je smještena na rijeci Zrmanji (10 km uzvodno od mjesta Obrovac).



Sl. 2.3. Reverzibilna hidroelektrana Velebit [10]

Jedan od najstarijih vrsta energije koja se koristi je dakako i **energija plime i oseke** kojoj jedna od glavnih prednosti je da ne zagađuje okoliš za razliku od ostalih. Ona se može koristiti gradeći polupropusne brane preko estuarija sa visokom plimom te korištenjem toka plime i oseke na otvorenom moru. Osim svoje prednosti, navedeni oblik energije ima i nedostatak koji se očituje u velikim troškovima obzirom da se radi o ogromnim projektima koji zahvaćaju velika područja. Najstarija i najveća elektrana na plimu i oseku se nalazi u Francuskoj u La Ranceu (Sl.2.4.) koja je u pogon ušla 1966. godine., a njena snaga je 240 MW. Energija plime i oseke je zapravo hidroenergija koja iskorištava kretanja vode, a koja se događa zbog morskih mijena, odnosno spuštanja i dizanja u razini mora. Energija plime i oseke se stvara zahvaljujući generatorima koji su ustvari velike podvodne turbine postavljena u područja s velikim morskim mijenama, projektirana na način da uhvate kinetičko kretanje nadirućih morskih mijena, a sve kako bi došlo do stvaranje električne energije.



Sl. 2.4. Elektrana na plimu i oseku u Francuskoj u La Ranceu [11]

Iako se u raznim literaturama mogu pronaći različite podjele hidroelektrana jedna od češćih je ona koja ih dijeli na male i velike hidroelektrane. U ovom poglavlju opširnije ću opisati rad malih hidroelektrana obzirom da je za iste karakteristično da nemaju štetan utjecaj na okoliš i prirodu odnosno nema emisija ugljičnog dioksida u okoliš, što je važno glede klimatskih promjena i

globalnog zatopljenja, a štite i od poplava dok velike hidroelektrane imaju velik utjecaj na tlo, poplavljivanje, slatkovodni živi svijet te utječe na povećanje emisije metana. Male hidroelektrane ne zahtijevaju korištenje lokacija koje sadrže velike površine. Većina lokacija, pogodnih za građenje velikih hidroelektrana su iskorištene tako da se u posljednje vrijeme sve češće razmatra građenje malih hidroelektrana koje unatoč svojoj veličini koriste veliku snagu, odnosno troškovi njihove gradnje po vatu su ponekad i veći nego kod gradnje velikih hidroelektrana. Jedan je od vodotokova na kojem postoje brojne mogućnosti za izgradnju malih hidroelektrana pregradnjom postojećih ili napuštenih mlinova (vodenica) rijeka Mrežnica. Njena ukupna duljina iznosi 64 km, visinska razlika 148 m, a prosječni godišnji protok 34 $m^3$/s, [12]. Valja napomenuti da je poslije Azije, Europa druga u svjetskoj proizvodnji električne energije iz malih hidroelektrana. MHE osim svojih mnogih prednosti imaju i nedostataka poput sakupljanja i skladištenja smeća, prolaza za ribe i drugo. Sustav MHE sastoji se od svih objekata i dijelova koji služe za sakupljanje, dovođenje i odvođenje vode, za pretvaranje mehaničke u električnu energiju, za transformaciju i razvod električne energije. Raspon snaga MHE nije jednak u svim zemljama svijeta obzirom, a donja granica snaga obično se kreće od 10 do 150 KW, dok se ona gornja kreće od 1 do 30 MW. Za razliku od velikih, kod malih hidroelektrana postoji težnja za pojednostavnjivanjem dijelova cijelog sustava i njihovim normiranjem, čime se postiže jednostavnost, veća brzina i manja cijena izgradnje. Najveći udio obnovljivih izvora, 58,32% u svjetskoj proizvodnji električne energije 2006. godine imaju velike hidroelektrane, dok najmanji udio, od 0,16 % imaju elektrane na bioetanol.

Svi dijelovi sustava MHE mogu se podijeliti u tri osnovne skupine:

- građevinski dijelovi (brana, zahvat, dovodni kanali: derivacijski ili tlačni cjevovodi, strojarnica i odvodni kanali),
- hidrotehnički dijelovi (zapornice, rešetke, pjeskolovi, predturbinski zatvarači i izlazni dijelovi turbine),
- elektrostrojarski dijelovi (turbine, multiplikatori, generatori, transformatori, regulacijski i zaštitni dijelovi, spoj na elektroenergetski sustav), [13].

Jedan gigavatsat električne energije proizvedene u MHE znači: smanjenje emisije od 580 tona ugljikovog dioksida ($CO_2$), opskrbu električnom energijom u jednoj godini za 250 kućanstava u

razvijenim zemljama, a za 450 kućanstava u zemljama u razvoju te uštedu 220 tona goriva ili uštedu 335 tona ugljena, [14]. Vodotoke u Republici Hrvatskoj karakterizira veliki broj lokacija s malim padovima. U većini slučajeva povoljne lokacije nalaze se u gornjim dijelovima vodotoka, što u našim nepristupačnim uvjetima znači na slabo naseljenim područjima, iz čega proizlazi da u tim dijelovima ne postoji velika potrošnja i kvalitetno razvedena distributivna mreža. Najpoznatija MHE u Hrvatskoj puštena je u pogon 28.08.1895.. godine, a radi se o hidroelektrani Jaruga (Sl. 2.5.) unutar nacionalnog parka Krka te je druga najstarija u svijetu a prva u Europi.



Sl. 2.5. Hidroelektrana Jaruga [15]

# 3. UTJECAJI NA RAZLIČITE VRSTE VODNIH TURBINA

## 3.1. Vodna turbina

Vodne turbine počele su se razvijati u 19. stoljeću, a danas se pretežito koriste za dobivanje električne energije. Pojam turbina dolazi od latinske riječi „vir“, a vodnu turbinu definiramo kao dio strojarnice u kojem se potencijalna energija vode prvotno pretvara u kinetičku energiju, a potom se kinetička energija pretvara u mehanički rad za pogon električnog generatora. U pravilu se sastoji od kućišta sa statorskim lopaticama i rotora, odnosno turbine. Izbor tipa turbine za odgovarajuće uvjete je vrlo važan. Osnovni kriterij za izbor tipa turbine su visina pada i količina protoka, dok su ostali kriteriji korisnost, cijena i slično.

Snaga na osovini vodne turbine $P_T$ u kW određena je relacijom:

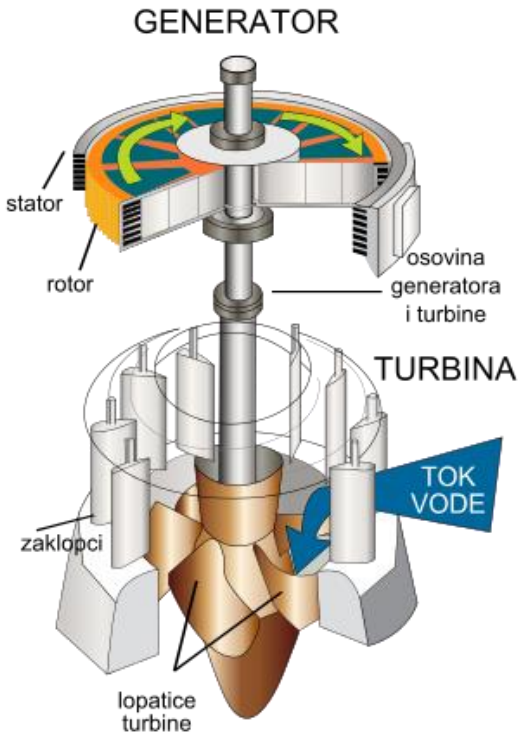
$$P_t = 9{,}81 \cdot Q \cdot H_n \cdot \eta_t [16] \tag{3-1}$$

Oznaka $Q$ označava protok kroz turbinu ($m^3/s$), oznaka $H_n$ predstavlja neto pad koji djeluje na ulazu u turbinu, a oznaka $\eta_t$ predstavlja korisnost turbine.

Da bi se odredila snaga na stezaljkama generatora potrebno je snagu na osovini turbine pomnožiti s korisnošću generatora $\eta_G$:

$$P = 9{,}81 \cdot Q \cdot H_n \cdot \eta_T \cdot \eta_G \tag{3-2}$$

Osim o opterećenju generatora, korisnost generatora ovisi i o faktoru snage s kojim radi generator, a neto pad neke hidroelektrane ovisi o razini donje i gornje vode te o gubicima u dovodu i odvodu vode.




Sl 3.1. Vodna turbina i generator u presjeku [17]

## 3.2. Podjela vodnih turbina

U literaturi se mogu naći različite podjele vodnih turbina, međutim najčešća je ona koja vodne turbine (ovisno o padu, protoku i tlaku) dijeli na:

1.Turbine slobodnog mlaza (akcijske),

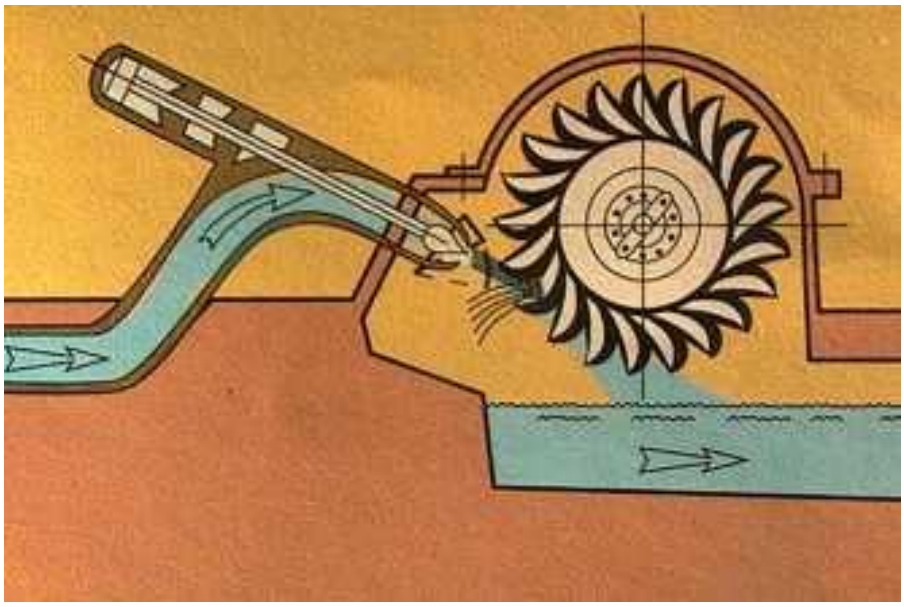
2.Predtlačne (reakcijske) turbine.

Akcijske turbine su slične vodenom kolu (udubljene lopatice - okreću se u zraku) i koriste se za velike padove (okomito >10m) i za velike tlakove, a tlak je jednak i na ulazu u rotor i izlazu,[18].

Turbine slobodnog mlaza (akcijske) su:

- Peltonova turbina (Sl. 3.2.) koju je 1878. godine konstruirao Amerikanac Pelton, idealna je za veliki pad i male količine vode, voda prolazi kroz tlačni vod te kroz sapnice velikom brzinom prska lopatice turbine, [19],

- Turgonova turbina koja je inačica Peltonove turbine, ali je projektirana da ima veću specifičnu brzinu te
- Banki - Michell turbina koja služi za velike vodene tokove i manje padove, međutim za nju je karakteristično da se izvodi samo s vodoravnom osovinom.



Sl. 3.2. Peltonova turbina [20]

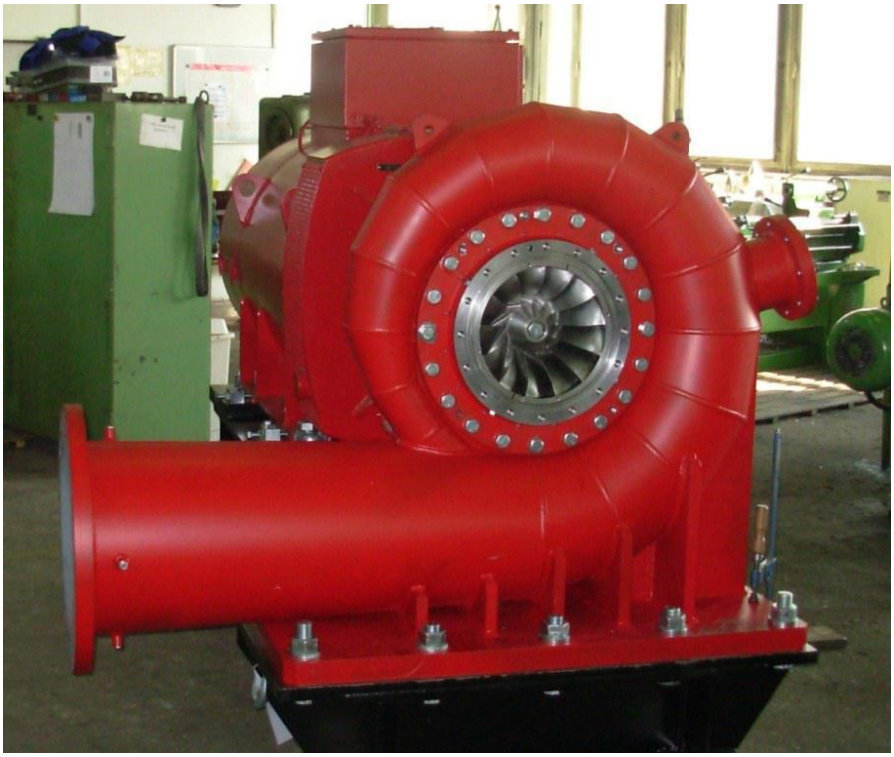
Glavni dio **reakcijskih turbina** je radno kolo, a ostali dijelovi su: spiralni dovod, statorske lopatice, difuzor i ležajevi. Lopatice kod reakcijskih turbina su slične brodskoj elipsi (potopljene u vodi) i koriste se za male padove pri velikim protocima i malim tlakovima, a tlak je veći na ulazu u rotor u odnosu na njegov izlaz.

Predtlačne (reakcijske) turbine su:

- Francisova turbina,
- Kaplanova turbina te
- Propelerna turbina, odnosno Kaplanova turbina s nepomičnim rotorskim lopaticama.

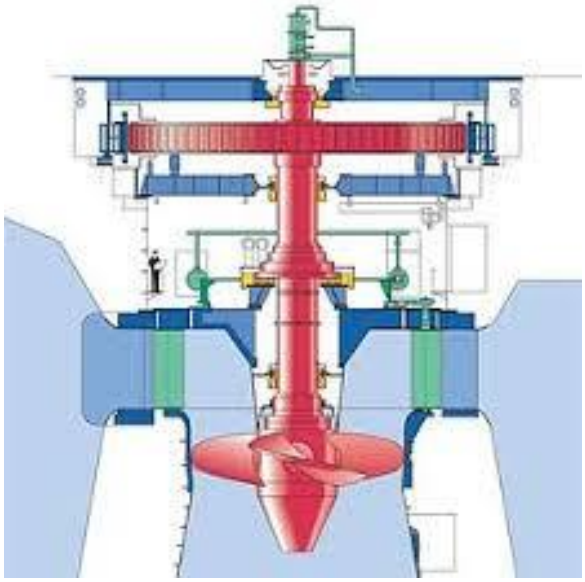
**Francisovu turbinu (**Sl. 3.3) konstruirao je Amerikanac Francis 1848. godine iz čega proizlazi da je jedna od najstarijih vrsta turbina koja se najviše upotrebljava u malim hidroelektranama. Ono što Francisovu turbinu čini posebnim je jest kućište u obliku puževe kućice. Ista turbina se upotrebljava kod malog pada i srednjih količina vode te je kod nje moguće pomicati samo stator.

Voda radijalno ulazi u rotor i napušta odnosno izlazi duž rotacijske osi (aksijalno). Posebne izvedbe ovog tipa turbina ponekad se upotrebljavaju i kod velikog pada i velikih količina vode,[21].



Sl. 3.3. Francisova turbina [22]

**Kaplanovu turbinu** (Sl.3.4.) je konstruirao Čeh Viktor Kaplan 1912. godine, a njezina specifičnost je da funkcionira kao brodski vijak obzirom da je kod njega osovina položena okomito te radi samo na niskim padovima vode. Lopatice turbine i stator mogu se pomicati te na taj način biti smještene u optimalni položaj s obzirom na smjer protjecanja vodenog toka koji teče duž osovine kroz rotor. Posebni je oblik Kaplanove turbine cijevna turbina kod koje je rotacijska osovina položena vodoravno. Oba tipa turbina rabe se kod malog pada i velikih količina vode, [23].



Sl. 3.4. Kaplanova turbina [24]

# 4. UTJECAJ GENERATORA I REGULATOR TLAKA

Osim vodne turbine, strojarnicu hidroelektrane čini i generator koji na samom izlazu daje napon od niskog nazivnog izmjeničnog napona pa do otprilike 25 kV. Generator u hidroelektranama se naziva i hidrogenerator, a može biti sinkroni i asinkroni generator koji se vrlo rijetko koristi. Sastavni dijelovi generatora su rotor (sastoji se od osovine, jarma, magneta, uzbudnog i prigušnog namota) i stator (sastoji se od jarma, zubi i utora statora te armaturnog namota).

Sinkroni generatori dijele se na:

- turbogenerator – generator koji ima veliku brzinu vrtnje (najčešće oko 3000 ili 1500 okretaja/min.), koristi parnu turbinu, sadrži jedan ili dva para polova, malih je dimenzija, sadrži čvrste konstrukcije radi izdržavanja velikih centrifugalnih sila pri velikoj brzini vrtnje, a ugrađeni su u termoelektrana i nuklearnim elektranama.

- Hidrogeneratori – generator koji ima manju brzinu vrtnje (najčešće od 50 do 100 okretaja/min, koristi vodnu turbinu, sadrži veći broj para polova od naprijed navedenih turbogeneratora, velikih je dimenzija.

Asinkroni generator s obzirom na konstrukciju može biti: kolutni (kad se u tijelu rotora nalaze utori u koje se smješta namot, najčešće trofazni), i kavezni (kad se u utorima rotora nalaze bakreni ili aluminijski štapovi koji su s obje strane povezani kratkospojnim prstenovima).

U tlačnom tunelu hidroelektrane naglom promjenom brzine dolazi do znatnog povećanja tlaka u samom cjevovodu što dovodi do vodnog, odnosno hidrauličkog udara koji se može prepoznati najčešće po zvuku u cijevi. Jedna od mnogih i čestih situacija vodnog udara je smanjenje otvora na zatvaraču na nizvodnom kraju cjevovoda. Hidraulički udar ovisi o duljini cjevovoda, dimenzijama cjevovoda, protoku kroz isti cjevovod, njegovim elastičnim svojstvima te vremenu u kojom je zatvoren zatvarač. Prilikom uključivanja ili isključivanja crpki iz pogona može doći do naglih promjena brzina pa i do pojave vodnog udara. Kako bi se navedena situacija spriječila iza crpke se obično ugrađuje zračni kotlić koji je efikasna mjera za sprječavanje pojave vodnog udara u tlačnim sistemima srednje veličine sa protocima do 500 l/s i za cjevovode duljine do 10 km. U trenutku kada crpka ispadne iz pogona voda iz zračnog kotlića ide u tlačni cjevovod te se brzina u cijevi usporava dok se voda potpuno ne zaustavi. Kada dođe do zaustavljanja vode, tlak koji se nalazi u zračnom kotliću je manji od tlaka na drugom kraju cijevi pa počinje kretanje vode u suprotnom smjeru. Voda koja krene iz vodospreme zbog zatvorene klapne puni kotlić čijim

punjenjem tlak u istom raste što dovodi do usporavanja i po završetku do zaustavljanja protoka. Ovaj proces se konstantno ponavlja, a oscilacije se tokom vremena smanjuju zbog linijskih gubitaka u cijevi i lokalnih na ulasku u kotlić.

Svaka elektrana mora proizvoditi struju određene frekvencije (50 Hz), odnosno kod puštanja u pogon treba biti sinkronizirana na mrežu. Mogu postojati određena odstupanja reda veličine $\pm 0{,}2\%$. Regulator protoka pomaže da cjelokupni energetski sustav trpi promjene navedene frekvencije.

Obzirom da frekvencija struje koja je proizvedena generatorom ovisi o kutnoj brzini okretanja rotora generatora, iskazujemo je slijedećom formulom:

$$f=\frac{pn}{60} \tag{4-1}$$

gdje oznaka *f* predstavlja frekvenciju struje u periodima/sekundi, oznaka *n* broj okretaja u minuti a oznaka *p* broj parova polova generatora.

Kretanje rotora generatora određeno je jednadžbom stroja:

$$I\frac{d\omega}{dt}=M_v - M_0 \tag{4-2}$$

gdje oznaka I predstavlja polarni moment tromosti okretnih dijelova generatora, oznaka $\omega$ predstavlja kutnu brzinu generatora, oznaka $M_v$ predstavlja moment vanjskih sila koje pokreću stroj, a oznaka $M_0$ predstavlja moment sila otpora nastalih opterećenjem generatora i drugih disipativnih sila.

Uvjet konstantnosti frekvencije zahtijeva stalnu kutnu brzinu $d\omega/dt = 0$ što dovodi do činjenice da mora biti ispunjen uvjet $M_v = M_0$. Navedeno znači da moment vanjskih pokretačkih sila mora biti jednak momentu sila otpora.

Moment vanjskih sila je određen izrazom:

$$M_v = \frac{\eta\rho gHQ}{\omega} \tag{4-3}$$

gdje oznaka $\eta\rho gQH$ predstavlja iskorištenu snaga toka vode što znači da hidroelektrana mora raditi u režimu jednake snage. Promjena bilo kojeg od parametara koji definiraju snagu uzrokuje

promjenu snage na turbini, međutim da bi se izbjegle takve promjene (a time i frekvencije) u sklopu turbine nalazi se poseban regulator protoka koji na osnovu informacija o promjeni protoka ili tlaka mijenja položaj lopatica privodnog kola (ponekad i lopatica turbine) tako da bi se prilagodili protok $Q$ i pad $H$ da snaga ostane jednaka. Također, vidljivo je da se smanjenjem pada $H$ mora povećati protok $Q$ i obrnuto. Pri uključivanju turbine u pogon prazni se vodna komora i u njoj vodostaj opada što dovodi do smanjenja pada $H$ na turbini. Kako bi snaga bila konstantno jednaka, regulator povećava protok, što dodatno povećava pražnjenje komore. Sličan ali obrnut proces se odvija kod zaustavljanja turbine kad regulator smanjuje protok i povećava oscilaciju. Slijedom navedenog, regulator ima namjeru povećanja (amplificiranja) oscilacija.

# 5. FIZIKALNI MODEL TLAČNOG VALA PRI ZATVARANJU ZASUNA

U nastavku rada opisat ću naglo zaustavljanje toka vode na kraju tlačnog voda. Polazeći od pretpostavke da je zatvaranje zatvarača potpuno i trenutno, u kratkim crtama opisat ću faze širenja vodnog udara na primjeru jednostavne cijevi koja je smještena na izlazu vodospreme (građevina koja služi za akumuliranje vode i koja između ostalog ima za zadatak osigurati potreban tlak u tlačnom cjevovodu).

U čitavom cjevovodu tlak je jednak, a voda kreće prema zatvaraču ($v > 0$).

U fazi kompresije vremenski interval $0 < t < L/a$ u kojem granica između zone u kojoj je voda zaustavljena i zone u kojoj voda struji kreće se prema vodospremi sve dok ne dosegne profil vodospreme. U zoni u kojoj voda miruje postoji nadtlak $\Delta p = \rho \cdot a \cdot \Delta v$. U trenutku $t = L/a$ voda je zaustavljena u cijelom cjevovodu i izložena nadtlaku $\Delta p$.

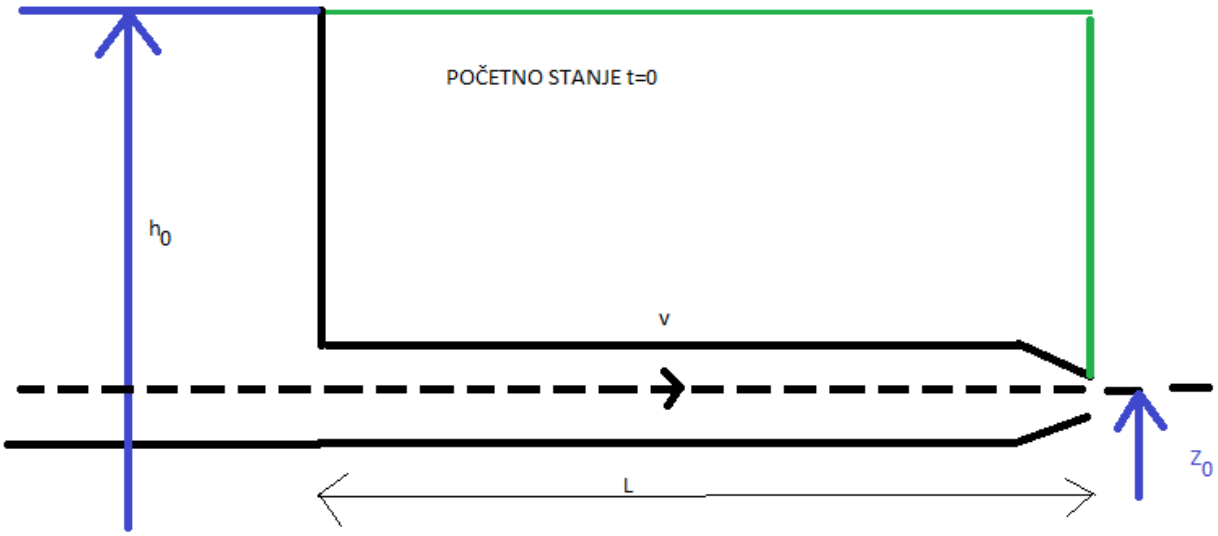
U fazi dekompresije, u intervalu $L/a < t < 2 \cdot L/a$ je voda u cijevi pod većim tlakom nego što je tlak u vodospremi. Stoga dolazi do strujanja u smjeru prema vodospremi $v < 0$ što dovodi do potpunog rasterećenja $\Delta p = 0$. U trenutku $t = 2 \cdot L/a$ voda u cijevi struji prema vodospremi, dok je tlak u cijeloj cijevi $\Delta p = 0$. Slijedi faza podtlaka, u kojoj voda struji prema vodospremi te po inerciji želi produžiti gibanje u istom smjeru. Pošto je zatvarač zatvoren, namjera vode da nastavi gibanje će uzrokovati pad tlaka u profilu zatvarača pa će se cjevovod skupljati a voda razrjeđivati. Pad tlaka ima vrijednost – $\Delta p = \rho \cdot a \cdot \Delta v$. Fronta sa smanjenim tlakom se kreće prema vodospremi. U trenutku $t = 3 \cdot L/a$ voda je u cijelom cjevovodu zaustavljena i izložena podtlaku $\Delta p$. U fazi rasterećenja smanjeni tlak omogućuje ponovno punjenje cjevovoda brzinom v u smjeru prema zatvaraču. Ispred fronta poremećaja je podtlak $\Delta p$ i brzina punjenja vode $v = 0$. Iza fronta poremećaja je brzina v i početni tlak p. U trenutku $t = 4 \cdot L/a$ je u cijeloj cijevi tlak jednak početnom tlaku p a brzina jednaka početnoj brzini v kao što je bilo prije samog zatvaranja zatvarača. S obzirom na sve izneseno, kružni proces došao je na sami početak i kružni procesi pojedinih faza se ponavljaju na način kao što je opisano.

Front poremećaja (zaustavljanja vode) se širi brzinom- a

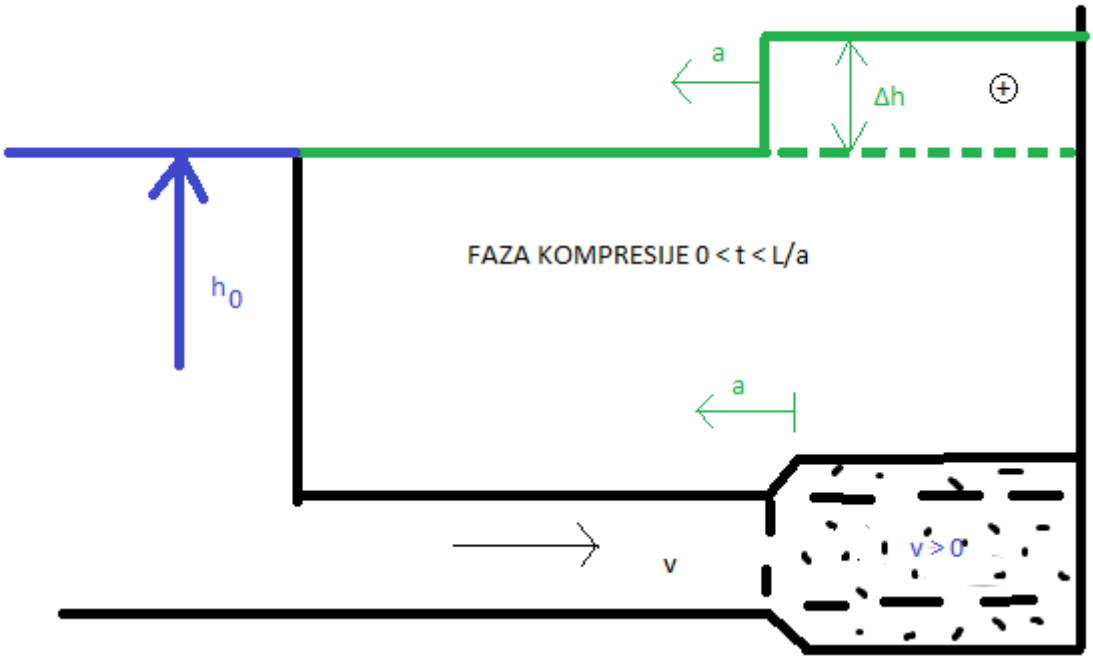
Gustoća vode- $\rho$

Tlak- p

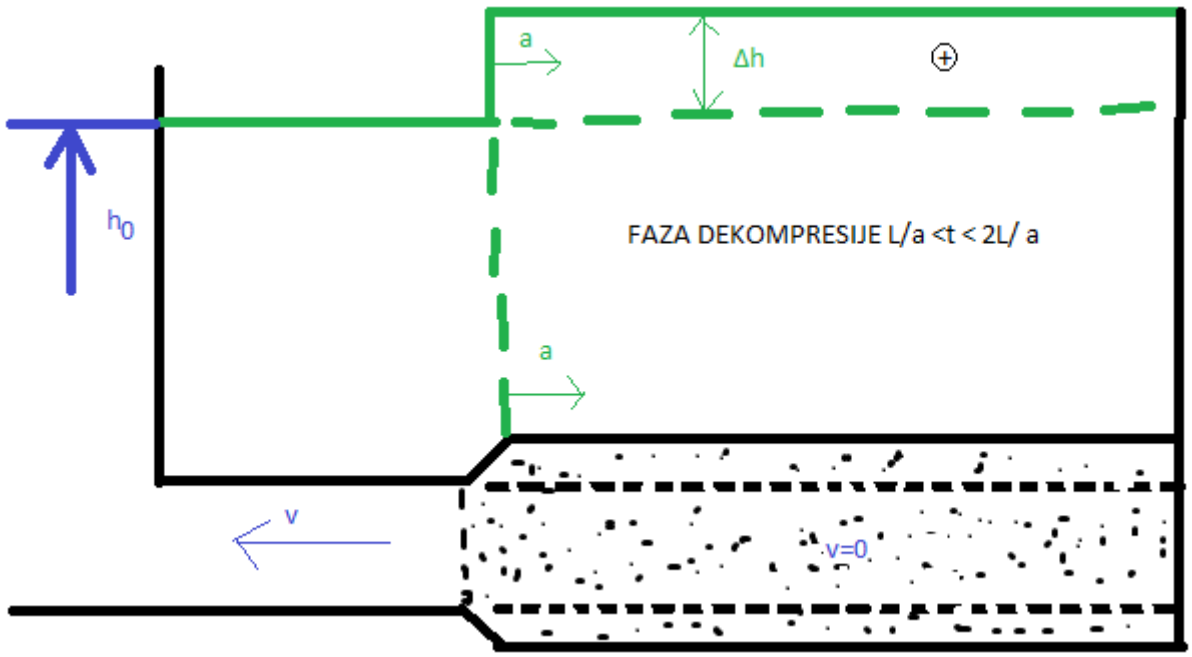
$\Delta h = -\frac{a}{g} \Delta v$



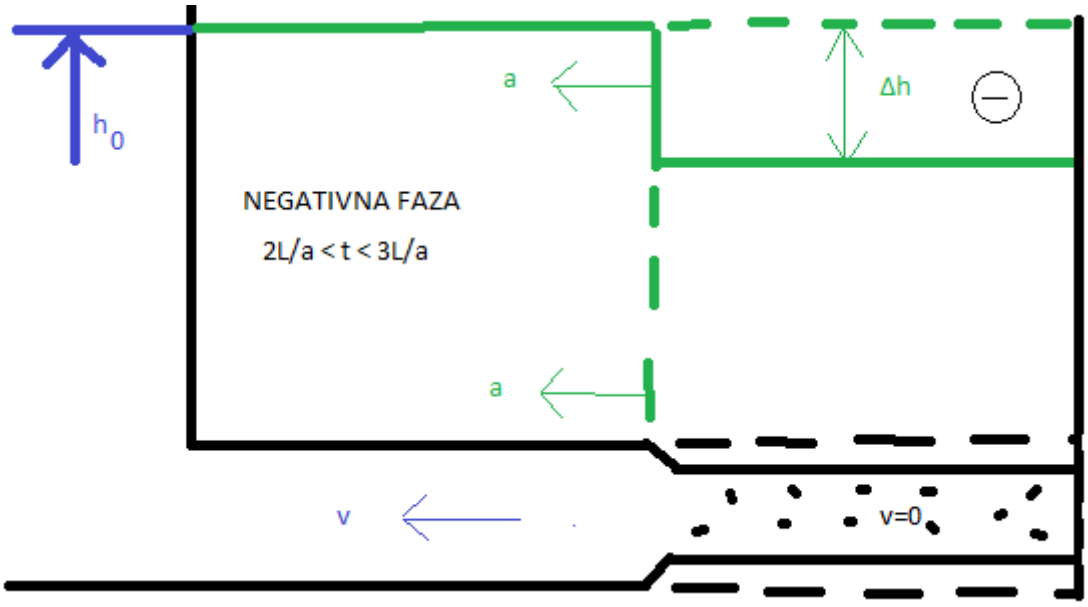

Sl. 5.1.a) Faze propagacije vodnog udara



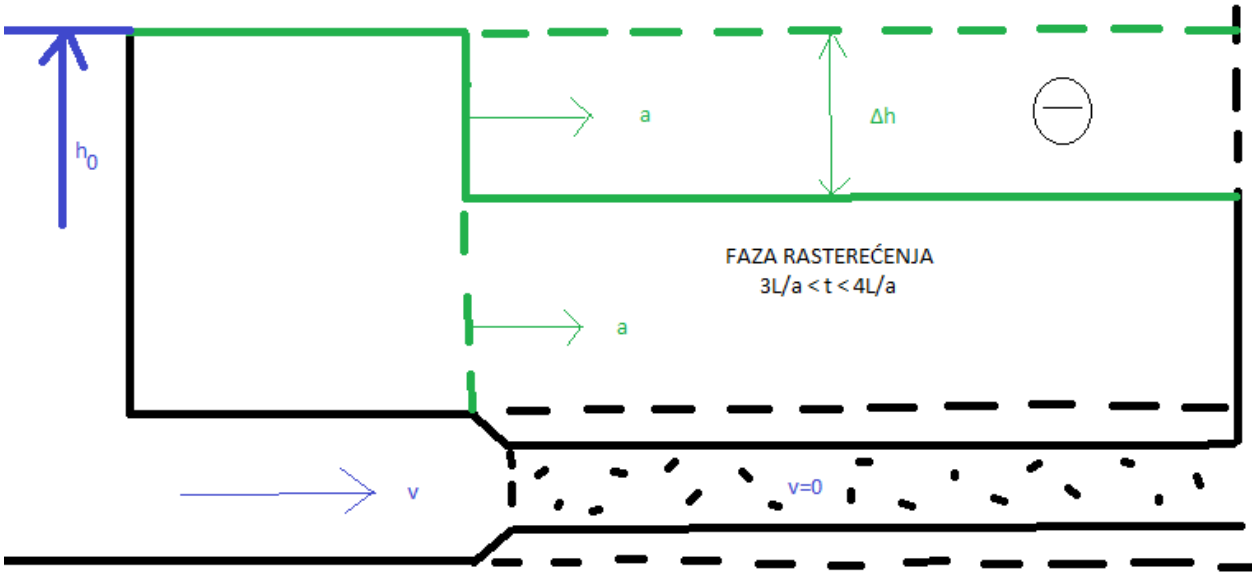

Sl. 5.1.b) Faze propagacije vodnog udara



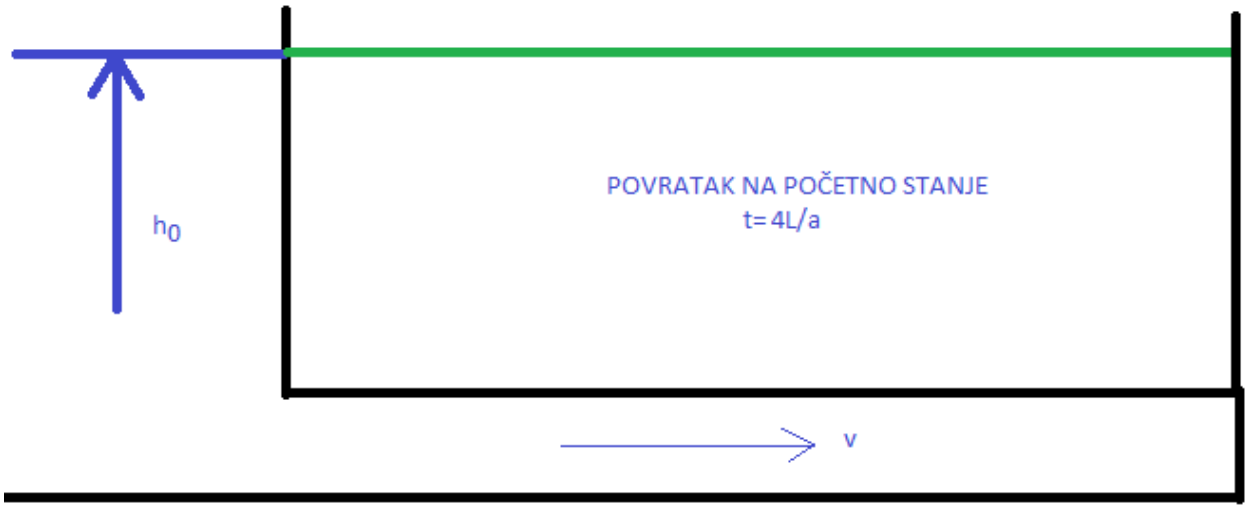

Sl. 5.1.c) Faze propagacije vodnog udara




Sl. 5.1.d) Faze propagacije vodnog udara




Sl. 5.1.e) Faze propagacije vodnog udara




Sl. 5.1.f) Faze propagacije vodnog udara [25]

# 6. OPIS MALE PROTOČNE HIDROELEKTRANE NA RIJECI KRUPA

U nastavku ovog diplomskog rada opisati ću zahvat izgradnje male protočne hidroelektrane sa snagom od 1217 kW, a koja je smještena na riječi Krupa na katastarskim česticama k.č.br. 809/3, 1743, 1735, 1202/1 i 1181 u katastarskoj općini k.o. Krupa. Svrha izgradnje predmetne hidroelektrane je proizvodnja i isporuka električne energije u elektro-distribucijski sustav, a obuhvaća:

- zahvat vode do 4,94 $m^3/s$,
- dovodni kanal s bazenom za sedimentacju čestica ≥ 0,25 mm,
- cjevovod dužine 252 m s promjerom od 1600 mm,
- strojarnicu za smještaj turbine, generatora, transformatora i opreme za nadzor i upravljanje,
- odvodni kanal,
- priključak na elektroenergetsku mrežu prema uvjetima tvrtke HEP-ODS d.o.o.

Ekološki prihvatljiv protok

Ekološki prihvatljiv protok određen je metodom Steinbach-Austrija (ESHA) te je uvećan 15% za zimski i ljetni period.

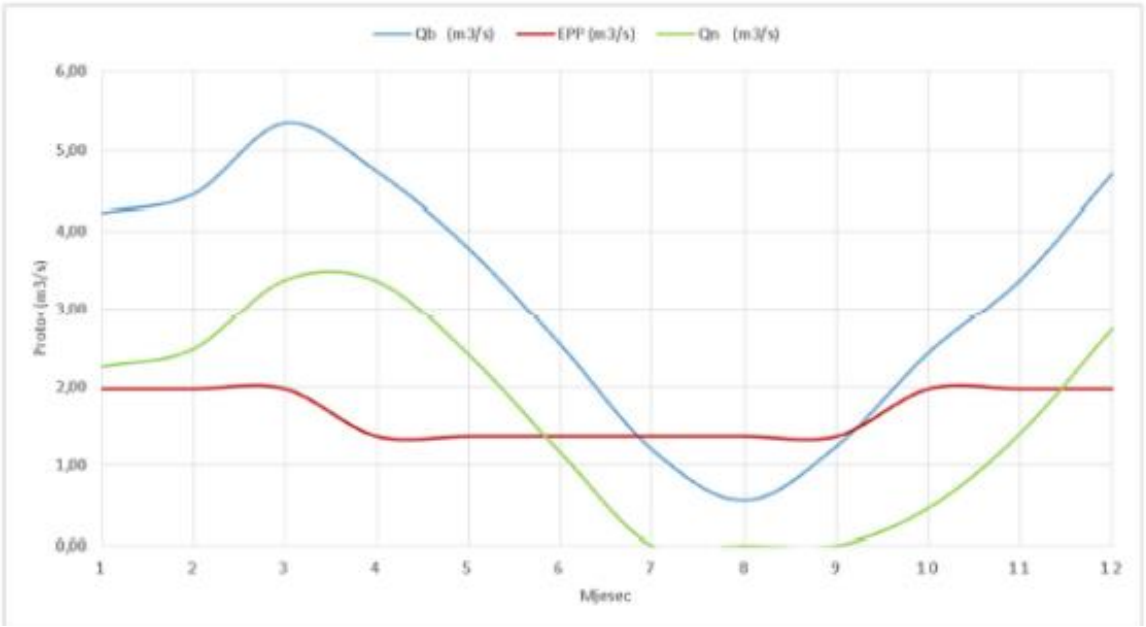
Tab. 6.1.Ekološki prihvatljiv protok [26].

| *EPP zima (X-III mjesec)* | | |
|---|---|---|
| $Q_{smin\ X-III}$ | 1,72 | $m^3/s$ |
| $Q_{eppz}$ | 1,97 | $m^3/s$ |

| *EPP ljeto (IV-IX mjesec)* | | |
|---|---|---|
| $Q_{smin\ IV-IX}$ | 1,20 | $m^3/s$ |
| $Q_{epplj}$ | 1,37 | $m^3/s$ |

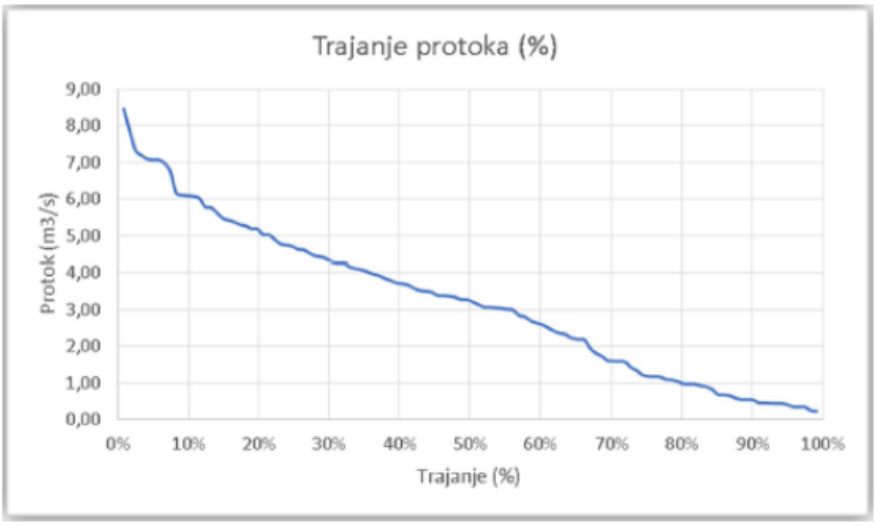
Tab. 6.2. Ekološki prihvatljiv protok po mjesecima [26].

| Mjesec | $Q_b$ ($m^3/s$) | EPP ($m^3/s$) | $Q_n$ ($m^3/s$) |
|---|---|---|---|
| I | 4,22 | 1,97 | 2,25 |
| II | 4,45 | 1,97 | 2,48 |
| III | 5,35 | 1,97 | 3,38 |
| IV | 4,73 | 1,37 | 3,36 |
| V | 3,78 | 1,37 | 2,41 |
| VI | 2,54 | 1,37 | 1,17 |
| VII | 1,21 | 1,37 | 0,00 |
| VIII | 0,56 | 1,37 | 0,00 |
| IX | 1,25 | 1,37 | 0,00 |
| X | 2,43 | 1,97 | 0,46 |
| XI | 3,38 | 1,97 | 1,41 |
| XII | 4,70 | 1,97 | 2,73 |




Sl. 6.1. Ekološki prihvatljiv protok po mjesecima [26]

Bruto potencijal protoka:



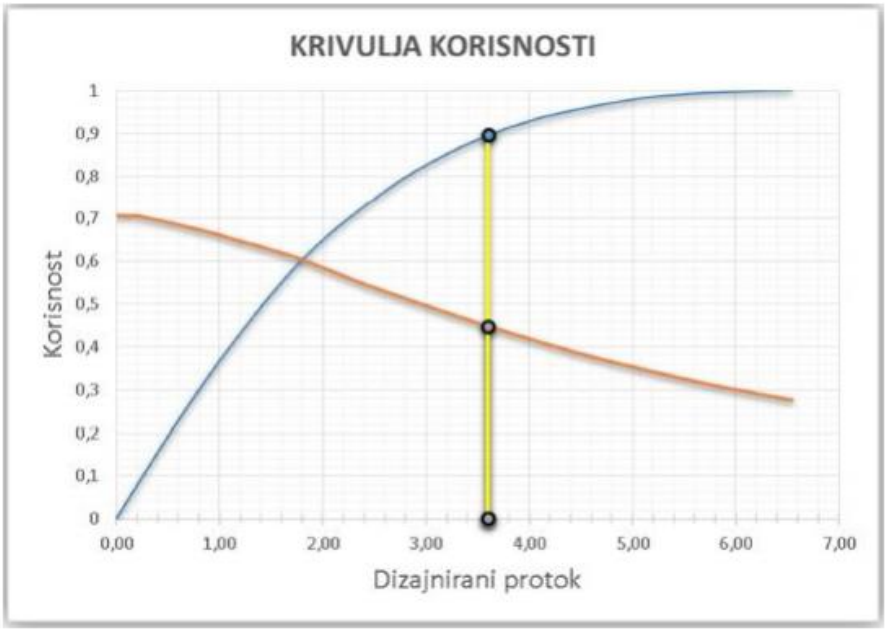

Sl. 6.2. Bruto potencijal protoka [26]

Tab. 6.3. Protok male protočne hidroelektrane [26].

| | | |
|---|---|---|
| **Dizajn protoka** | [l/s] | 3600 |
| **Volumen koji bi se mogao preusmjeriti** | [$m^3$] | 56 847 162 |
| **Preusmjereni godišnji volumen** | [$m^3$] | 55 490 508 |
| **Postotak preusmjerenog volumena** | [%] | 97,61 |
| | | |
| **Prosječni godišnji protok kroz turbinu** | l/s] | 1760 |

Korisnost protoka male HE: 89,77 %

Korisnost male HE: 44,74 %

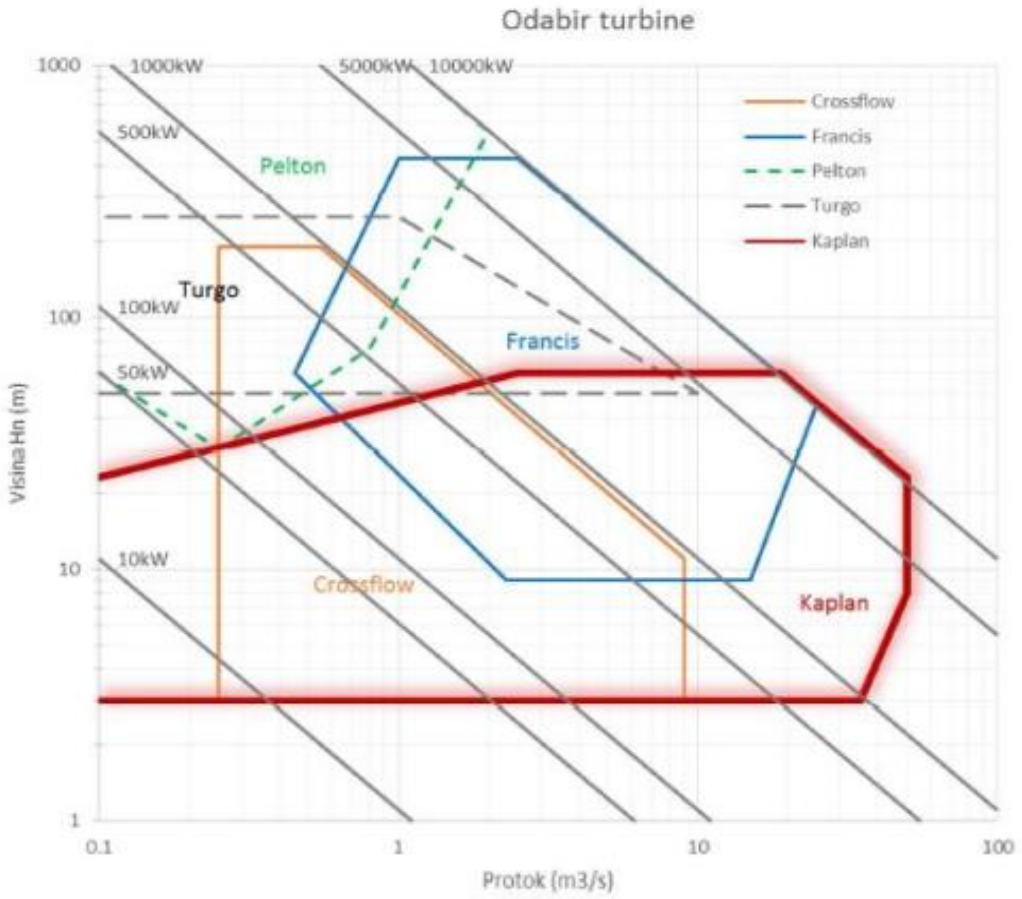



Sl. 6.3. Krivulja korisnosti [26]

Tab. 6.4. Odabir turbine [26].

Neto pad

| | | |
|---|---|---|
| Dizajnirani protok | **[l/s]** | **3600** |
| Bruto pad | **[m]** | **30,09** |
| | | |
| | **Dužina (m)** | **Promjer/širina (m)** |
| Dovodni kanal | **133** | **2,00** |
| Cjevovod | **252** | **1,60** |
| | | |
| Manning koeficijent (n) cjevovod | | **0,012** |
| Manning koeficijent (n) dovodni kanal | | **0,012** |
| | | |
| Gubitak u dovodu | **[m]** | **0,15** |
| Gubitak u cjevovodu Hf | **[m]** | **0,49** |
| Gubitak na ventilu | **[m]** | **0,02** |
| Ostalo: | **[m]** | **0,07** |
| Ukupno: | **[m]** | **0,73** |
| | | |
| Neto pad sa dizajniranim protokom | **[m]** | **29,36** |



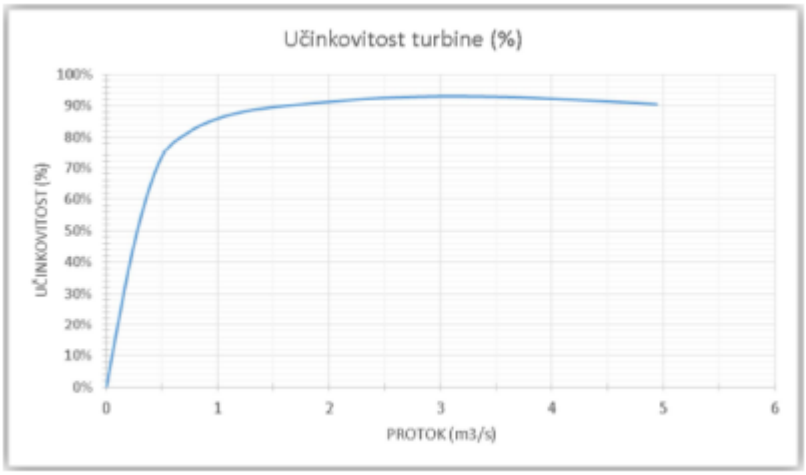

Sl. 6.4. Odabir turbine [26]

Tab. 6.5. Protok turbine [26].

| Tip turbine Kaplan TKS-G-900-860 | | | |
|---|---|---|---|
| Maksimalna korisnost | [-] | 93,00% | |
| Eff. Q projekta | [-] | 87,82% | |

| Minimalni protok za turbinu: | | | |
|---|---|---|---|
| Q/$\boldsymbol{Q_p}$ | 12,28% | $Q_{MIN}$ [m$^3$/s] | 0,44 |

| **Snaga (kw)** | **%** | **Protok ($m^3/s$)** |
|---|---|---|
| 0 | 0,00% | 0,00 |
| 0 | 0,00% | 0,00 |
| 0 | 45,90% | 0,25 |
| 103 | 73,00% | 0,49 |
| 174 | 81,60% | 0,74 |
| 245 | 85,80% | 0,99 |
| 315 | 88,20% | 1,24 |
| 381 | 89,50% | 1,48 |
| 450 | 90,40% | 1,73 |
| 520 | 91,20% | 1,98 |
| 587 | 91,90% | 2,22 |
| 658 | 92,50% | 2,47 |
| 727 | 92,80% | 2,72 |
| 795 | 93,00% | 2,97 |
| 825 | 93,00% | 3,08 |
| 859 | 93,00% | 3,21 |
| 925 | 92,90% | 3,46 |
| 990 | 92,70% | 3,71 |
| 1050 | 92,30% | 3,95 |
| 1111 | 91,90% | 4,20 |
| 1172 | 91,50% | 4,45 |
| 1231 | 91,00% | 4,70 |
| 1287 | 90,50% | 4,94 |




Sl. 6.5. Učinkovitost turbine [26]

**Godišnja proizvodnja električne energije:**

**Karakteristike male hidroelektrane:**

Dizajnirani protok: 3600 [l/s]

Maksimalni protok: 4940 [l/s]

Bruto pad: 30,09 [m]

Tip turbine: KAPLAN

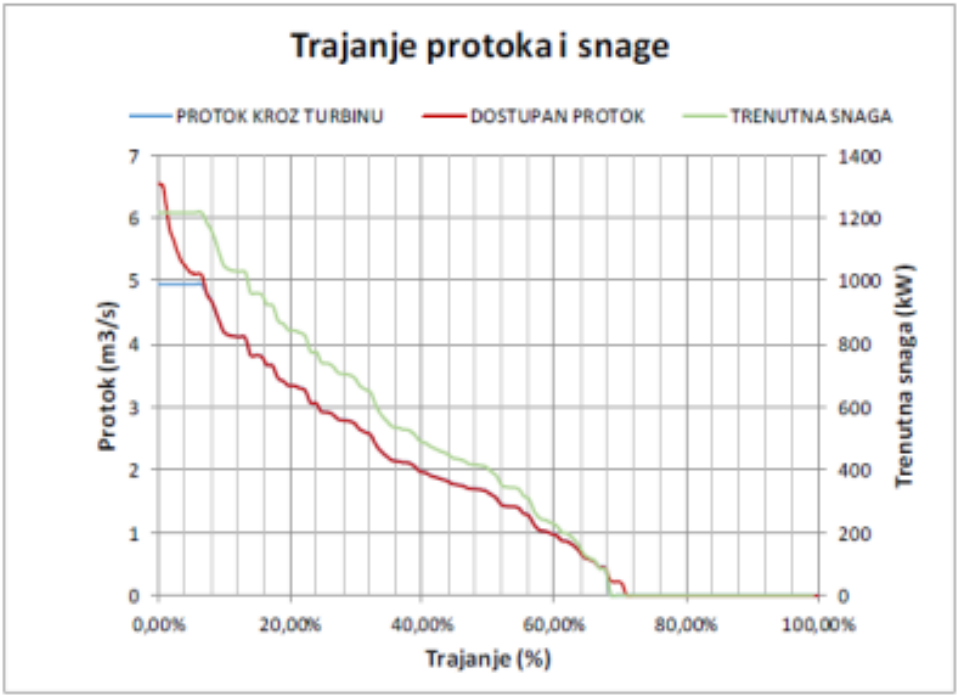
Tab. 6.6. Snaga turbine [26].

**Snaga:**

| **Učinkovitost turbine (Qd)** | **[%]** | **87,82%** |
|---|---|---|
| **Gubici dovoda** | [m] | 0,73 |
| **Maksimalni hidraulični gubici** | [%] | 2,42% |
| **Učinkovitost generatora** | [%] | 95,50% |
| **Učinkovitost transformatora** | [%] | 99,00% |
| **Učinkovitost prijenosa** | [%] | 100,00% |

| **Maksimalna snaga** | **[kW]** | **1151** |
|---|---|---|
| **Prosječna snaga** | [kW] | 600 |
| **Nominalna snaga** | [kW] | 980 |

| **Godišnja proizvodnja energije** | **[MWh]** | **3.768** |
|---|---|---|
| **Teoretsko trajanje rada elektrane** | [dani] | 250 |




Sl. 6.6. Trajanje protoka i snage [26]

**Opis sustava**

Prema dobivenim podacima raspoloživog protoka i proračunom dobiva se podatak za godišnju proizvodnju energije. Proračun polazi od raspoloživog protoka za navedenu lokaciju dobivenog iz podataka DHMZ-a za predmetnu lokaciju i geodetski snimljenih visina na osnovu kojih je određena bruto visina. U proračunu proizvodnje energije uzeti su u obzir svi gubici sustava i prikazani su kroz gubitak visine, to jest bruto visina je umanjena za gubitke.

Tab. 6.7. Osnovni podaci elektrane [26].

| | | |
|---|---|---|
| Maksimalna priključna snaga elektrane: | 1250 kW | |
| Predviđena godišnja proizvodnja: | 3768 MWh | |
| Način proizvodnje: | Kontinuirano | |
| Geodetska točka postrojenja: | Zahvat vode: | E: 452770,90 |
| HTRS96/TM | N: 4895393,60 | |
| Strojarnica: | E: 452526,70 | |
| N: 4894962,60 | | |
| Nazivni napon: | 10 kV | |
| Turbina: | KAPLAN 1220 kW, TKS-G-900-860 | |
| Generator: | Sinkroni 1620 kVA, 0,4 kV (MJT-630LA12) | |
| Transformator: | 1600 kVA – 0 / 10 kV SUHI | |
| Maksimalni protok: | 4,94 $m^3/s$ | |
| Bruto visina Hb: | 30,09 m | |
| Gubici Hg: | 0,73 m | |
| Neto visina Hn: | 29,36 m | |

Tarifni sustav Republike Hrvatske za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora energije i kogeneracije trenutno predviđa tri kategorije malih hidroelektrana:
a) hidroelektrane instalirane snage do uključivo 300 kW
b) hidroelektrane instalirane snage veće od 300 kW do uključivo 2 MW
c) hidroelektrane instalirane snage veće od 2 MW do uključivo 5 MW.

Idejnim rješenjem predlaže se slijedeće rješenje male protočne hidroelektrane:
a) izgradnja male protočne hidroelektrane instalirane izlazne snage do uključivo 2000 kW zbog ostvarenja prodajne cijene za isporučenu električnu energiju u elektro-distribucijski sustav kao povlašteni proizvođač električne energije
b) izgradnja zahvata vode za volumen do 4,94 $m^3/s$

c) izgradnja dovodnog kanala sa bazenom za sedimentaciju čestica ≥ 0,25 mm
d) izgradnja tlačnog cjevovoda promjera 1600 mm
e) izgradnja strojarnice i odvodnog kanala
f) ugradnju turbine Kaplan snage 12200 kW
g) ugradnju sinkronog generatora izlazne snage 1420 kVA
h) ugradnju opreme za nadzor i upravljanje
i) ugradnja transformatora 0,4/10(20) kV (1,6 kVA)

Procijenjena proizvodnja električne energije male protočne hidroelektrane na navedenoj lokaciji iznosi 3.767 MWh/godišnje.

Zahvat vode treba omogućiti dotok projektiranog volumena vode u dovodni kanal. Bazen za sedimentaciju je projektiran da iz vode ukloni čestice promjera ≥ 0.25 mm. Tlačni cjevovod je promjera 1600 mm te zadovoljava projektirani protok volumena vode do turbine.
Odvodni kanal vraća vodu nazad rijeku i projektiran je za ţemeljni volumen vode. U strojarnici je smještena elektrostrojarska oprema (turbina, generator, transformator, oprema za nadzor i upravljanje).

Hidromehanička oprema (zaporna vrata, ventili,...) služi za regulaciju volumena i brzine vode kroz sustav hidroelektrane.

Preljevnim pragom se povećava vodna razina i omogućuje nesmetano zahvaćanje potrebne količine vode za rad hidroelektrane. Planirana je izgradnja preljevnog praga gornje širine 1 m i duljine 39,45 m na stacionari 103+870 m rijeke Krupe. Preljevni prag će podići razinu vode na izvoru na kotu 149,59 m.n.m. Dno rijeke prije preljevnog praga je na visinskoj koti 147,70 m.n.m. Ukupna visina preljevnog praga je 1,5 m. Preljevni prag će svojim djelovanjem utjecati na podizanje nivoa vode u zoni od cca 6 m uzvodno. U toj zoni utjecaja preljevnog praga, nema infrastrukturnih objekta, i podizanje nivoa vode neće utjecati na okolno tlo. Izgradnjom preljevnog praga potrebno je urediti obalu i korito rijeke prije i poslije preljeva u ukupnoj dužini cca 18 m. Uz preljevni prag predviđen je regulirani ispust za ekološki prihvatljiv protok. Preljevni prag konstruiran je tako da usmjeri potreban protok do 4,94 $m^3/s$ u sustav male protočne hidroelektrane. Sustav nadzora i kontrole sam regulira uzvodni i nizvodni nivo vode, ekološki prihvatljiv protok. Prema hidrološkim podacima za protoke sa stanice Krupa izvor izračunate su maksimalne vrijednosti vjerojatnosti povrata velikih voda:

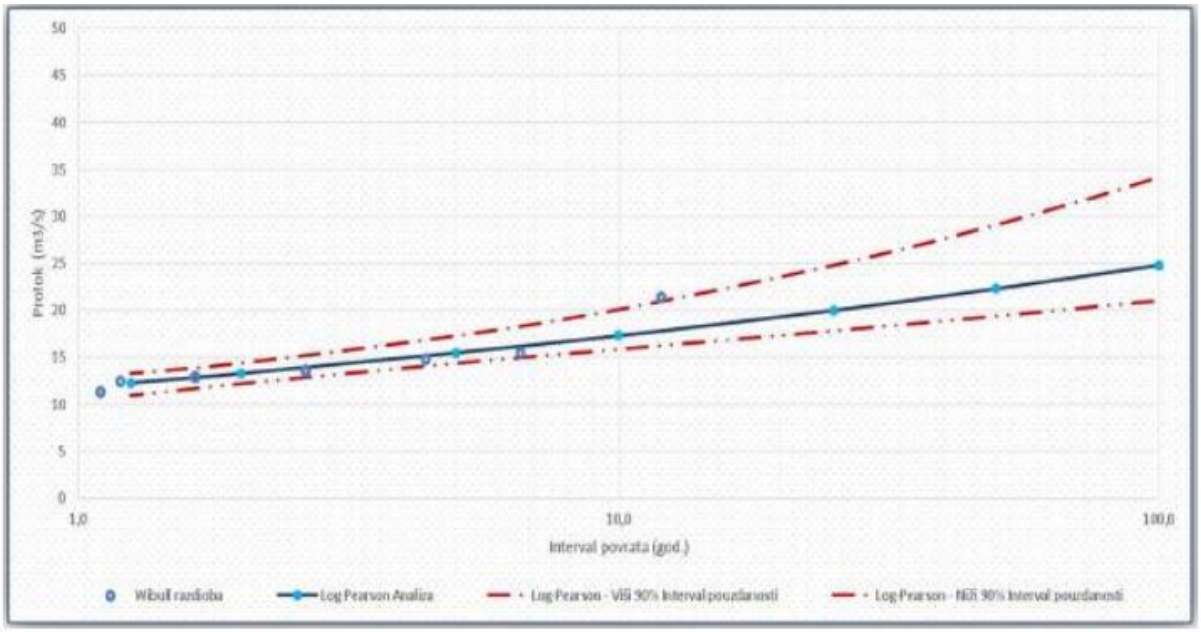
Tab. 6.8. Vjerojatnost povrata velikih voda [26].

| Godina | Max. protok ($m^3/s$) |
|---|---|
| **1980** | 14,80 |
| **1981** | 13,50 |
| **1982** | 15,40 |
| **1983** | 13,50 |
| **1984** | 14,80 |
| **1985** | 13,50 |
| **1986** | 12,90 |
| **1987** | 12,90 |
| **1988** | 12,40 |
| **1989** | 11,30 |
| **1990** | 21,30 |
| **1991** | 12,90 |

Tab. 6.9. Vjerojatnost povrata velikih voda [26].

| **Period povrata (godina)** | **Vjerojatnost povrata (%)** | **Maksimalni protok ($m^3/s$)** | **90% interval pouzdanosti** | |
|---|---|---|---|---|
| | | | **Viši ($m^3/s$)** | **Niži ($m^3/s$)** |
| **200** | 0,5 | 27,50 | 40,20 | 22,80 |
| **100** | 1 | 24,80 | 34,20 | 21,00 |
| **50** | 2 | 22,30 | 29,10 | 19,40 |
| **25** | 4 | 20,00 | 24,80 | 17,80 |
| **10** | 10 | 17,30 | 20,10 | 15,90 |
| **5** | 20 | 15,50 | 17,30 | 14,40 |
| **2** | 50 | 13,30 | 14,40 | 12,20 |
| **1,25** | 80 | 12,30 | 13,30 | 10,90 |

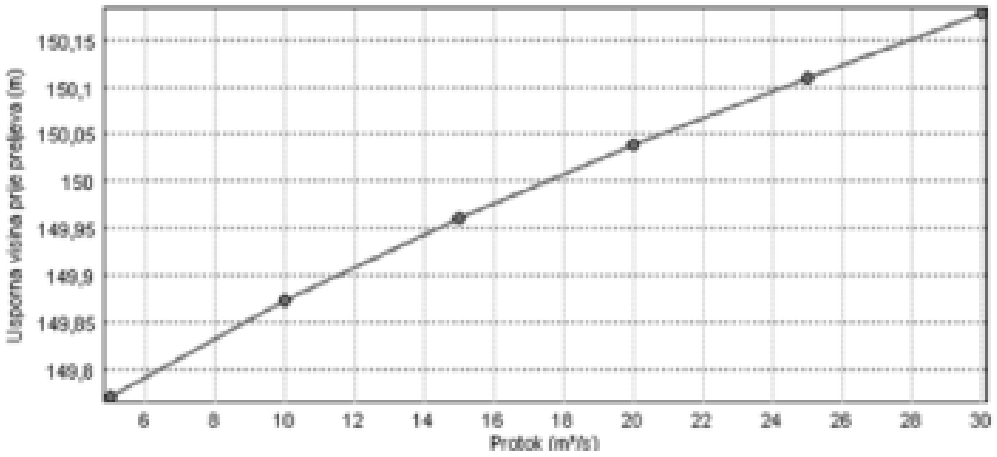
Prema navedenim vrijednostima maksimalnih protoka, sustav zahvata vode treba biti projektiran tako da može propustiti protok od 24,80 $m^3/s$




Sl. 6.7. Vjerojatnost povrata [26].

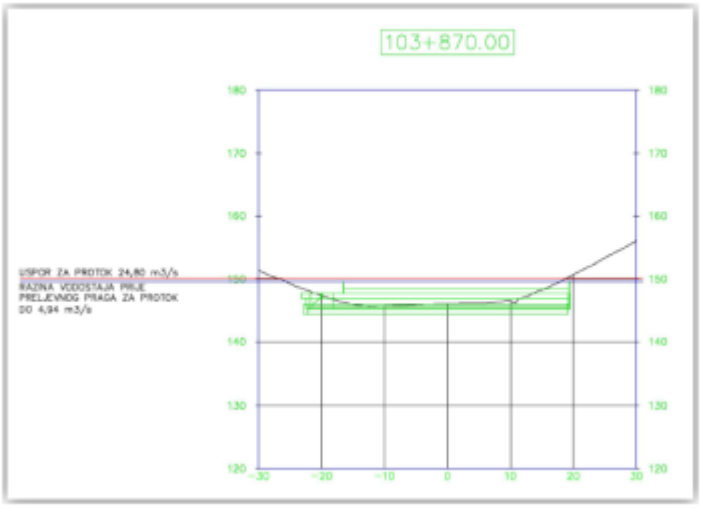
Tab. 6.10. MAHE Krupa 1, protok 24,80 $m^3/s$ i preljevni prag [26].

| **Opis projekta** | | |
|---|---|---|
| **Podizanje razine vode** | | |
| **Ulazni podaci** | | |
| **Pražnjenje** | | 24,80 $m^3/s$ |
| **Najveća visina** | | 149,59 m |
| **Visina razine vode** | | 147,70 m |
| **Površina vode** | | |
| **Širina** | | 1,00 m |
| **duljina** | | 39,00 m |
| **Rezultati** | | |
| **Nadmorska visina** | | 150,11 m |
| **Područje protoka** | | 20,21 $m^2$ |
| **Brzina** | | 1,23 m/s |




Sl. 6.8. Usporna visina preljevnog praga [26]

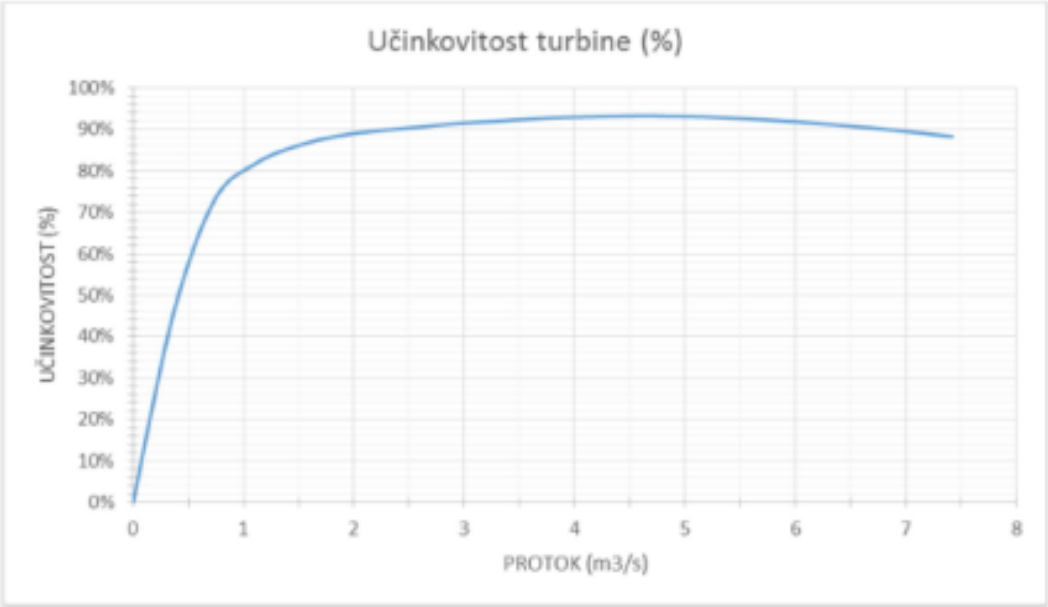
Usporna visina prije preljevnog praga, za protok od 24,80 m³/s je 0,52 m. Gornja kota uspora je 150.11 m.n.m.




Sl. 6.9. Uspor za navedeni protok [26]

Tab. 6.11. Za predloženi sustav koristiti će se turbina Kaplan TKS-G-900-860 slijedećih karakteristika [26].

| **Turbina** | **TKS-G-900-860** |
|---|---|
| **Broj turbina** | 1 |
| **Unutrašnji promjer** | 900 mm |
| **Broj okretaja** | 600 rpm (o/min) |
| **Neto pad** | 29,32 mm |
| **Protok** | 3,60 $m^3/s$ |
| **Snaga turbine** | 1220 kW |
| **Frekvencija** | 50 HZ |
| **Učinkovitost** | 88% |
| **Min. Pad** | 25,50 m |
| **Max. Pad** | 27,50 m |
| **Bruto pad** | 30,09 m |
| **Broj lopatica** | 6 kom |




Sl. 6.10. Učinkovitost turbine [26]

# ZAKLJUČAK

U današnje vrijeme kada je u svijetu potreba za električnom energijom u porastu , proizvodnja energije iz obnovljivih izvora od velike je važnosti. Velika prednost obnovljivih izvora energije, a tako i hidroelektrana, je smanjena ili u potpunosti eliminirana emisija stakleničkih plinova. Razlog tomu je što kao pokretač turbine (električnog generatora) ne koriste fosilna goriva. Stoga električna energija koja nastaje u hidroelektranama postaje unosnija, te neovisna o cijeni i ponudi fosilnih goriva na tržištu. Životni vijek je puno veći kod hidroelektrana u odnosu na elektrane na fosilna goriva. Glavno ograničenje za izgradnju hidroelektrane je voda, obzirom da kroz cijelu godinu treba biti dostupan izvor vode. Uzimajući u obzir hidro potencijal koji ima Hrvatska u odnosu na potrošnju električne energije, izgradnja svih malih hidroelektrana imala bi velik udio u proizvodnji energije iz obnovljivih izvora energije. Među najbrojnijim projektima za izgradnju hidroelektrana u Hrvatskoj su upravo oni za izgradnju malih hidroelektrana, te sam iz tog razloga u svom diplomskom radu opisao malu protočnu hidroelektranu koja je trebala biti izgrađena na rijeci Krupa. Uzimajući u obzir akumulacijske i protočne hidroelektrane, protočne su ekološki prihvatljivije, ekonomski isplativije, te su jednostavnije za izvesti, nije potrebno raseljavati stanovništvo jer ne može doći do poplava. U budućnosti ćemo se u većini slučajeva oslanjati na hidroenergiju. Rijeke i vodeni tokovi su puno stabilniji tokom cijele godine u odnosu na druge obnovljive izvore kao što su sunce i vjetar čiji intenziteti variraju i ovise o meteorološkim uvjetima.

## POPIS UPOTRIJEBLJENE LITERATURE


[1] Lj., Majdandžić, Obnovljivi izvori energije, Zagreb, Graphis d.o.o., 2008., 87. str.

[2] H., Meluzin, Elektrotehnika, Zagreb, 302. str.

[3] Lj., Majdandžić,Obnovljivi izvori energije, Zagreb, Graphis d.o.o., 2008., 87. str.

[4] web stranica, http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=792182&page=73, 22. kolovoza 2017. godine

[5] web stranica, http://powerlab.fsb.hr/enerpedia/index.php?title=ENERGETSKE_TRANSFORMACIJE, 22. rujna 2017. godine

[6] M., Kalea, Električna energija, Kigen d.o.o., Zagreb, 2007., str. 133

[7] V., Potočnik, Obnovljivi izvori energije i zaštita okoliša u Hrvatskoj, Sveučilišna tiskara d.o.o., Zagreb, 41. str.

[8] M., Kalea, Električna energija, Kigen d.o.o., Zagreb, 2007., 133. str.

[9] M., Kalea, Električna energija, Kigen d.o.o., Zagreb, 2007., 136. str.

[10] web stranica, http://osservatorioitaliano.org/read/130525/croazia-la-hep-nelle-centrali-idroelettriche-fino-al-2019-investera-21-miliardi-di-kn, 15. kolovoza 2017. godine

[11] web stranica, http://www.izvorienergije.com/energija_oceana.html, 16. kolovoza 2017. godine

[12] Lj., Majdandžić, Obnovljivi izvori energije, Zagreb, Graphis d.o.o., 2008., 99. str.

[13] Lj., Majdandžić, Obnovljivi izvori energije, Zagreb, Graphis d.o.o., 2008., 98. str.

[14] Lj., Majdandžić, Obnovljivi izvori energije, Zagreb, Graphis d.o.o., 2008., 98. str.

[15] web stranica, https://hr.wikipedia.org/wiki/Hidroelektrana_Jaruga, 02. kolovoza 2017. godine

[16] H., Požar, Snaga i energija u elektroenergetskim sistemima, Informator, Zagreb, 1983., str.190

[17] web stranica, https://hr.wikipedia.org/wiki/Vodna_turbina, 21. srpnja 2017. godine

[18] Lj., Majdandžić, Obnovljivi izvori energije, Zagreb, Graphis d.o.o., 2008., 89. str.

[19] V., Potočnik, Obnovljivi izvori energije i zaštita okoliša u Hrvatskoj, Ministarstvo zaštite okoliša i prostornog uređenja RH, Zagreb, 2002., 41. str.

[20] web stranica, http://hidroelektrane1.blogspot.hr/, 20. kolovoza 2017. godine,

[21] V., Potočnik, Obnovljivi izvori energije i zaštita okoliša u Hrvatskoj, Ministarstvo zaštite okoliša i prostornog uređenja RH, Zagreb, 2002., 41. str.

[22] web stranica, http://cink-hydro-energy.com/hr/francisova-turbine-3/, 15. srpnja 2017. godine

[23] V., Potočnik, Obnovljivi izvori energije i zaštita okoliša u Hrvatskoj, Ministarstvo zaštite okoliša i prostornog uređenja RH, Zagreb, 2002., 41. str.

[24] web stranica, https://hr.wikipedia.org/wiki/Kaplanova_turbina, 20. kolovoza 2017. godine,

[25] web stranica, https://www.scribd.com/document/214491846/h04-Sistemi-Pod-Tlakom, 16. kolovoza 2017. godine

[26] Elaborat zaštite okoliša za ocjenu o potrebi procjene utjecaja zahvata na okoliš, izgradnja male protočne hidroelektrane krupa 1, 1217 kw, od travnja 2015. godine, izrađen od strane Agencije za razvoj i kontrolu sigurnosti d.o.o. za zaštitu na radu, zaštitu od požara i zaštitu od okoliša

## SAŽETAK

U diplomskom radu opisani su u kratkim crtama počeci stvaranja hidroelektrana te potreba za proizvodnjom hidroenergije. Iako u literaturi postoje brojne podjele hidroelektrana navedene su podjele koje se najčešće spominju te je opisan normalan pogon hidroenergije. Dalje u tekstu predstavljen je pojam vodnih turbina te njezine vrste, a opisani su i utjecaji na različite vrste vodnih turbina. Osim utjecaja na vodne turbine opisan je utjecaj generatora i regulatora tlaka. Predstavljen je i fizikalni model tlačnog vala pri zatvaranju zasuna te je opisano zaustavljanje toka vode na kraju tlačnog voda koji dovodi do samog vodnog udara. Na kraju samog diplomskog rada predstavljen je rad male protočne hidroelektrane koja je smještena na rijeci Krupa.



**Ključne riječi:** hidroelektrana, snaga, vodna turbina, generator, vodni udar, protok, cjevovod



## ABSTRACT

This graduation thesis briefly describes the beginnings of hydro power generation and needs for hydropower production. Although in literature exist many classification of hydropower, in this thesis are listed the most commonly mentioned classificaton and it is described a normal hydro power plant. Further in the text has been described the term "water turbines" and their types, and influences on different types of water turbines. Apart from the influence on water turbines, in the text is described the influence of generators and pressure regulators. It is presented the physical model of the pressure wave at the closing of the latch and it is described the stopping of the water flow at the end of the pressure water which leads to a water strike. At the end of this graduate thesis is introduced the work of a small hydro power plant located on the river Krupa.



**Keywords:** hydroelectric power, power, water turbine, generator, water stroke, flow, pipeline

# ŽIVOTOPIS

Danijel Ilakovac rođen je 17. kolovoza 1991 godine u Virovitici. Nakon završene osnovne škole u Virovitici, 2006. godine upisuje Tehničku školu u Virovitici, smjer elektrotehnika. Preddiplomski studij elektrotehnike na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku upisuje 2010. godine. Diplomski studij elektrotehnike, smjer elektroenergetika na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku upisuje 2014. godine.