

# Analiza strujanja kroz difuzor vodne turbine tip 1

---

**Franković, Fabio**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2022**

*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:190:579347>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-03**



*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI

**TEHNIČKI FAKULTET**

Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**ANALIZA STRUJANJA KROZ DIFUZOR VODNE TURBINE**

**TIP 1**

Rijeka, srpanj 2022.

Fabio Franković  
0069083351

SVEUČILIŠTE U RIJECI

**TEHNIČKI FAKULTET**

Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**ANALIZA STRUJANJA KROZ DIFUZOR VODNE TURBINE**

**TIP 1**

Mentor: Prof. dr. sc. Zoran Čarija

Rijeka, srpanj 2022.

Fabio Franković  
006908335

**SVEUČILIŠTE U RIJECI**  
**TEHNIČKI FAKULTET**  
POVJERENSTVO ZA ZAVRŠNE ISPITE

Rijeka, 15. ožujka 2022.

Zavod: **Zavod za mehaniku fluida i računarsko inženjerstvo**  
Predmet: **Hidraulički strojevi**  
Grana: **2.15.04 mehanika fluida**

## ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Fabio Franković (0069083351)**  
Studij: **Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva**

Zadatak: **Analiza strujanja kroz difuzor vodne turbine tip 1 / Numerical analysis of flow in water turbine draft tube type 1**

### Opis zadatka:

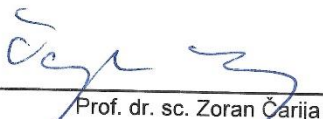
U okviru završnog rada potrebno je izraditi numeričku analizu strujanja kroz difuzor vodne turbine. Geometriju je nužno adekvatno umrežiti poštujući općeprihvaćena pravila. Potrebno je provesti numeričku analizu za različite uvjete strujanja te je nužno prikazati turbulentni tok nekompresibilnog fluida.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.


*Fabio Franković*

Zadatak uručen pristupniku: 21. ožujka 2022.

Mentor:

  
Prof. dr. sc. Zoran Čarija

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:

  
Prof. dr. sc. Kristian Lenić

# IZJAVA

Izjavljujem da sam prema članku 8. Pravilnika o završnom radu, završnom ispitu i završetku studija preddiplomskih sveučilišnih studija Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, samostalno izradio završni rad naslova „Analiza strujanja kroz difuzor vodne turbine tip 1“ pod vodstvom prof. dr. sc. Zorana Čarije.

Rijeka, srpanj 2022.

---

Fabio Franković

0069083351

# ZAHVALA

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Zoranu Čariji na pruženoj prilici i na pomoći pri izradi završnog rada.

Nadalje se zahvaljujem asist. dr. sc. Ivani Lučin na susretljivosti i odgovorima na sva moja pitanja kao i danim savjetima tijekom izrade rada.

Naposljetku bih se zahvalio svojoj obitelji koja mi je davala veliku podršku tokom cijelog studija.

## Sadržaj

1. UVOD .....	1
2. VODNE TURBINE.....	2
2.1. Akcijske turbine .....	4
2.1.1. Pelton-ova turbina .....	4
2.1.2. Turbina s križnim presjekom.....	7
2.1.3. Turgo turbina.....	8
2.1.4. Teslina turbina.....	8
2.1.5. Jonval-ova turbina .....	10
2.2. Reakcijske turbine .....	11
2.2.1. Kaplan-ova turbina .....	12
2.2.2. Francis-ova turbina.....	13
2.2.3. Arhimedov puž.....	14
3. DIFUZOR.....	15
3.1. Princip rada difuzora .....	16
3.2. Gubici u difuzoru.....	19
3.3. Analiza smanjenja izlaznih gubitaka korištenjem difuzora.....	20
3.4. Vrste difuzora .....	24
3.4.1. Ravni konični difuzor.....	24
3.4.2. Savinuti konični difuzor .....	24
3.4.3. Obični prošireni difuzor .....	25
3.4.4. Moody-ev difuzor.....	26
3.4.5. Difuzor s koljenom.....	27
4. ANSYS FLUENT.....	28
5. NUMERIČKA ANALIZA STRUJANJA KROZ DIFUZOR .....	31
5.1. Geometrija.....	31
5.2. Izrada numeričke mreže .....	33
5.3. Izrada simulacije.....	36
5.4. Prikaz rezultata.....	37
6. ZAKLJUČAK .....	44
7. LITERATURA .....	45
8. POPIS OZNAKA .....	47
9. POPIS SLIKA .....	48
10. SAŽETAK.....	50
11. ABSTRACT .....	51

# 1. UVOD

U današnjem svijetu postoji puno energenata i načina proizvodnje električne energije. Od najpoznatijih i najraširenijih, pogotovo u zemljama u razvoju, su ugljen, plin i nafta, odnosno fosilna goriva, pa do novijih i obnovljivih izvora energije koji su sve popularniji u razvijenijim zemljama. Jedna od novijih, poznatijih, izvora energije je nuklearna energija, dok u obnovljive izvore energije spadaju energija dobivena pomoću Sunčeva zračenja, energija dobivena pomoću kinetičke energije vjetra, energija dobivena biogorivima, geotermalna energija te hidroenergija. Hidroenergija je danas podosta popularna i pridonosi oko 24% sveukupne proizvedene energije na svijetu. Energija dobivena vodom je jedan od povoljnijih načina dobivanja energije u Europi i to zbog puno rijeka koje se tu nalaze. Primjerice, preko 90% energije proizvedene u Norveškoj je dobiveno preko hidroelektrana, a u Hrvatskoj taj broj je manji sa oko 55% (2008. godine). Učin hidroelektrana ovisi o mnogim dijelovima koji je sačinjavaju, a među njima se nalazi i difuzor.

Zadatak ovoga završnog rada je analiza strujanja kroz difuzor vodne turbine, pa je sukladno s time u prvom poglavlju pojašnjeno što su to uopće vodne turbine i na koji način rade. Nadalje su objašnjene vrste vodnih turbina te njihovu podjelu na akcijske i reakcijske turbine. Ukratko se navode predstavnici obje skupine vodnih turbina te će se spomenuti njihove karakteristike. Neke od turbina koje su navedene su Francis-ova turbina, Pelton-ova turbina, Kaplan-ova turbina i druge. U sljedećem se poglavlju govori o difuzoru i o njegovoj funkciji unutar cijelog postrojenja. Nadalje govori se i o vrstama difuzora i njihovim karakteristikama te u kojim se slučajevima uobičajeno koriste. U trećem poglavlju je opisan program Ansys Fluent, program koji je korišten tokom odrađivanja završnog rada. Ukratko se spominju neke od njegovih mogućnosti korištenja. U zadnjem poglavlju je opisan postupak stvaranja simulacije fluida kroz difuzor vodne turbine, odnosno način na koji je korišten program Ansys Fluent za ostvarivanje zadatka završnog rada te će biti postavljeni rezultati i kratka analiza istih.



## 2. VODNE TURBINE

Vodne turbine su jedne od prvih izuma čovječanstva koji ljudski ili životinjski rad zamjenjuju potencijalnom energijom vode iz okoline koju dobivamo. Već su stari Grci i Rimljani prepoznali i eksploatirali energiju vode pomoću vodeničkih kola koja su se koristila u svrhu mljevenja žita, a preteče moderne vodne turbine nastaju za vrijeme industrijske revolucije u 18. stoljeću.

Sve vodne turbine rade na istom principu u kojem je prvi postupak pretvaranje potencijalne energije vode u kinetičku energiju koja se odvija u prirodi. Zatim slijedi oduzimanje energije vode pomoću rotora turbine i pretvorba iste u mehaničku energiju i naposljetku pomoću generatora pretvorba mehaničke energije u električnu energiju. To postizemo tako da hidroelektrane uključimo u prirodnu cirkulaciju vode na Zemlji, odnosno u hidrološki ciklus. Hidrološki ciklus je prikazan na slici 2.1.

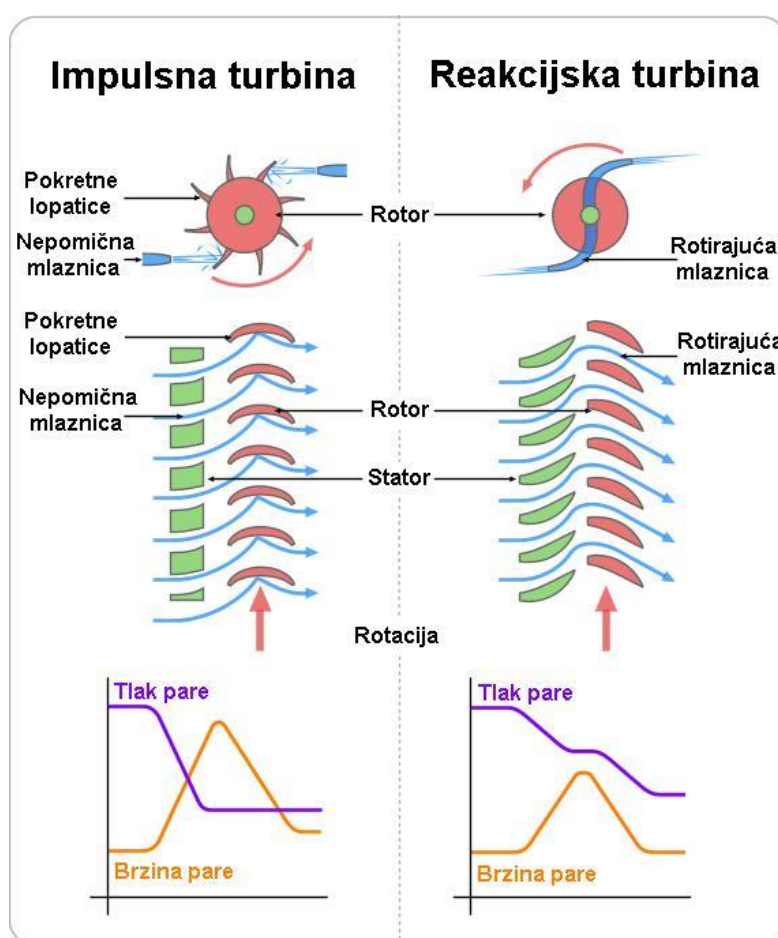


Slika 2.1. Hidrološki ciklus [1]

Hidroelektrane su velika postrojenja sastavljena od akumulacijskog jezera, vodne brane, dovodnog tunela, vodne komore, zasunske komore, tlačnog cijevovoda, račve, strojarnice i odvodnog kanala. U strojarnici hidroelektrane se nalazi sama vodna turbina i njezini su osnovni

dijelovi rotor, glavčina, vratilo generatora, statorske lopatice, regulacijske lopatice, spirala difuzora i generator [2].

Postoje dvije vrste vodnih turbina i to su akcijske ili impulsne i reakcijske turbine. Glavna razlika tih dviju skupina je mjesto gdje dolazi do pada tlaka. U slučaju akcijskih turbina, sveukupni pad tlaka događa se u statorskim lopaticama, dok kod reakcijskih turbina dolazi do pada tlaka djelomično u statorskim lopaticama, a djelomično u rotorskim lopaticama. Razlika akcijskih i reakcijskih turbina, među kojima je i dijagram promjene tlaka i brzine fluida, prikazana je shematski slikom 2.2.



Slika 2.2. Razlika akcijskih i reakcijskih turbina [3]

Odabir vrste turbine koja bi se koristila ovisi najviše o hidrostatskom tlaku, a manje ovisi o samom protoku vode s kojim raspolažemo. Tako npr. akcijske turbine pretežito koristimo pri visokim hidrostatskim tlakovima, a manjim protocima, dok reakcijske turbine pretežito koristimo u suprotnom slučaju.

## 2.1. Akcijske turbine

Akcijske odnosno impulsne turbine su vodne turbine koje se koriste mlaznicama za usmjeravanje toka vode i pretvorbu potencijalne energije vode u kinetičku energiju prije samog udara vode u lopatice turbine. Mlaz vode s većom brzinom pri izlasku iz sapnica usmjeren je na rotorske lopatice i pri udaru dolazi do promjene smjera gibanja mlaza vode. Promjena smjera gibanja mlaza uzrokuje stvaranje sile na rotorske lopatice koja okreće turbinu. Na taj način tubina preuzima dio energije mlaza te preusmjereni vodeni tok ima smanjenu energiju i brzinu. Prilikom udara mlaza u lopatice turbine nema pada tlaka, to jest tlak je jednak prije sudara mlaza s rotorskim lopaticama i nakon izlaska iz rotora.

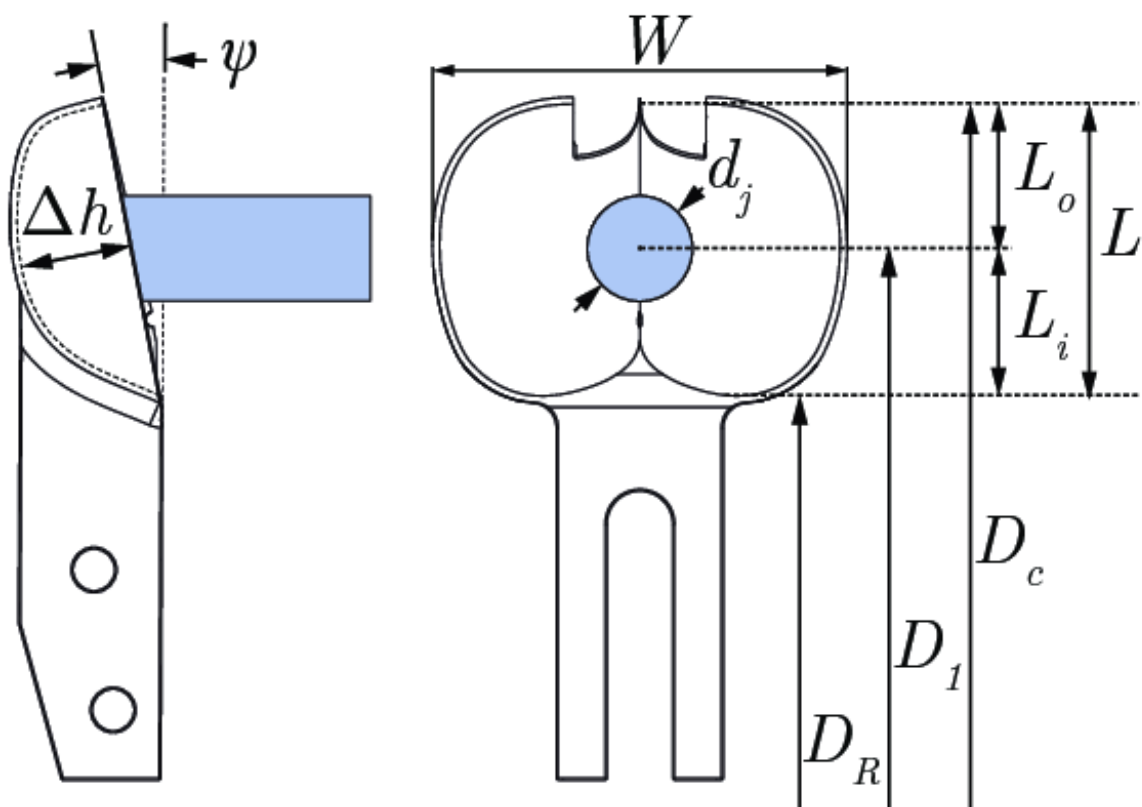
Akcijske se turbine pretežito koriste pri visokim padovima vode, tj. pri visokim hidrostatskim tlakovima i s manjim protocima vode.

Danas postoji više različitih vrsta impulsnih vodnih turbina, svaka sa svojim karakteristikama i one su:

- Pelton-ova turbina
- Turbina s križnim presjekom, tzv. crossflow turbina
- Turgo turbina
- Teslina turbina
- Jonval-ova turbina

### 2.1.1. Pelton-ova turbina

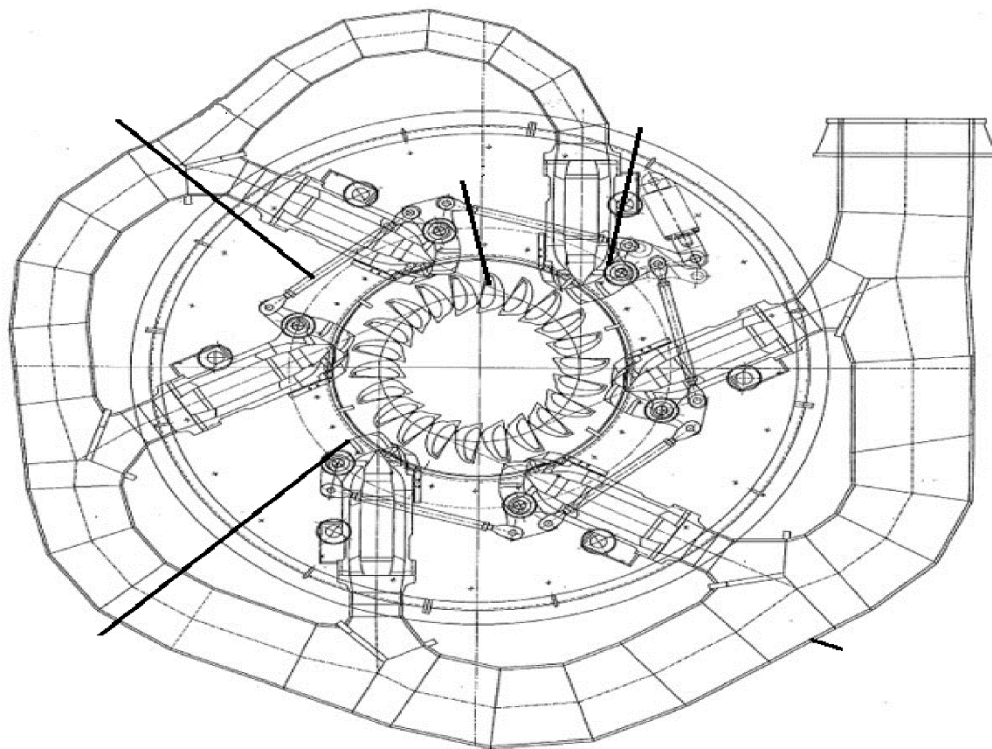
Peltonova turbina je, kako je rečeno u prošlom potpoglavlju, akcijska turbina koja se obično koristi pri velikim padovima, višim od 200 metara i manjim protocima vode. Izumio ju je Lester Allan Pelton u drugoj polovici 19. st. i ona je jedna od vodnih turbina s najvećim stupnjem iskoristivosti. Peltonova turbina je specifična u geometriji svojih lopatica koje imaju oštri brid koji ju dijeli na dva jednaka ovalna dijela. Takva geometrija lopatice postiže to da mlaz vode podijeli na dva dijela koji napuštaju lopaticu pod kutom od gotovo  $180^\circ$  [2].



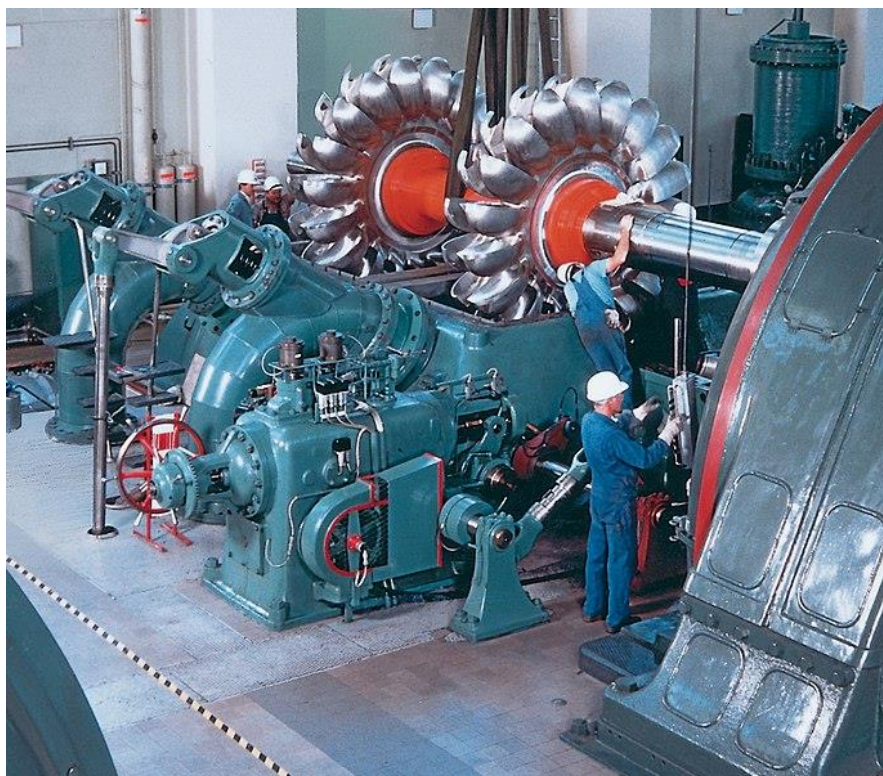
Slika 2.3. Geometrija lopatice Peltonove turbine [4]

Peltonova turbina je također specifična po tome što joj lopatice nisu stalno opterećene, već imaju samo privremeni kontakt s mlazom. Ovakva turbina može biti vrlo jednostavna s jednom mlaznicom i jednim rotorom koji može biti postavljen na okomito ili horizontalno vratilo, ali također se može naći i u kompliciranijem uređenju s više mlaznica ili s dva rotora. Povoljnija je izvedba s okomitim vratilom, ali je također potrebna vrlo pažljiva konstrukcija Peltonove turbine s dva rotora na okomitom vratilu. Na slici 2.4. se može vidjeti izvedba Peltonove turbine s 6 mlaznica, dok se na slici 2.5. može vidjeti višerotorska izvedba Peltonove turbine.

Protok u mlaznicama se vrši pomoću regulacijske igle i to njenim pomicanjem unutar mlaznice. Da ne bi došlo do kvarora uzrokovanih naglim zatvaranjem regulacijske igle, tzv. hidraulički udar, protok se pomoću regulacijske igle uvijek smanjuje postepeno. U slučajevima kad je potrebna naglo smanjenje protoka, koristi se deflektor koji „sječe“ mlaz te se on i općenito koristi pri pravovremenoj regulaciji protoka [2].



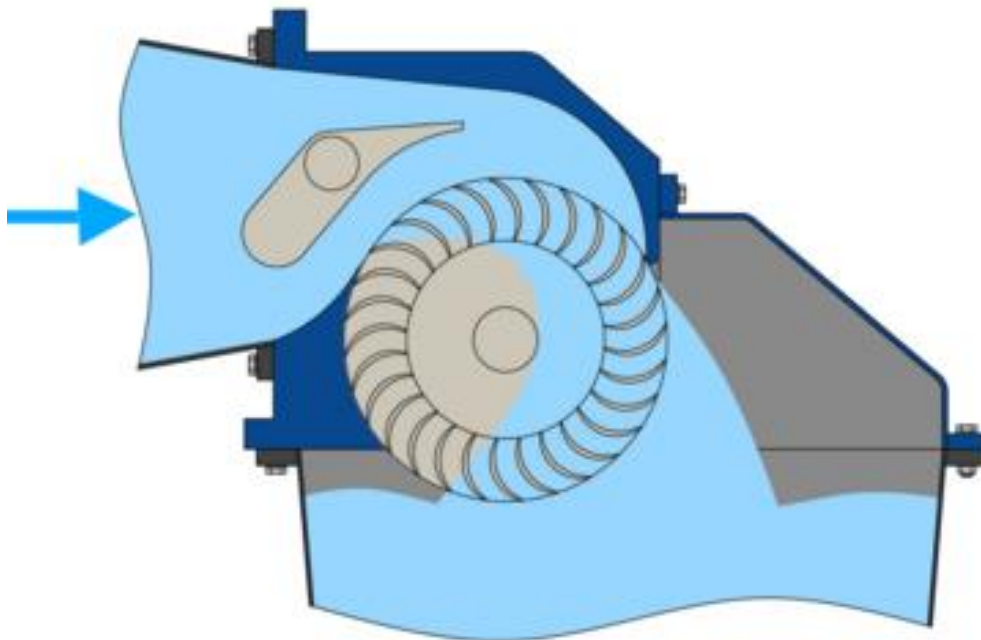
*Slika 2.4. Pelton-ova turbina s 6 sapnica [5]*



*Slika 2.5. Višerotorska peltonova turbina u HE Walchensee [6]*

### 2.1.2. Turbina s križnim presjekom

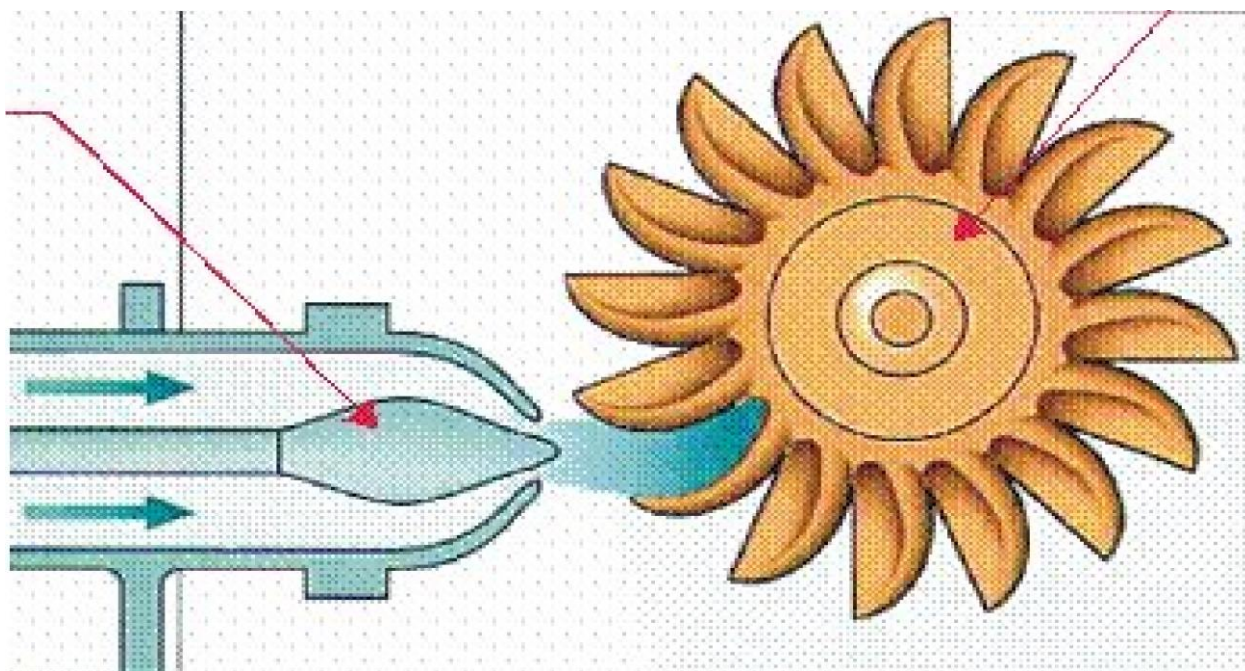
Turbina s križnim presjekom je jedna od jeftinijih vodnih turbina koja se koristi pri malim padovima i brzinama vode, ali pri većim protocima. Danas se najviše koristi izvedba Fritza Ossbergera u modeliranju ovakve vrste turbine, a ona se razlikuje od ostalih turbina koje imaju aksijalni ili radijalni protok vode u tome da mlaz vode pada poprečno i na taj način prolazi kroz lopatice turbine. S obzirom da mlaz vode prolazi dva puta kroz lopatice turbine, omogućuje turbinama s križnim presjekom veći stupanj iskoristivosti i također pri drugom prolazu kroz lopatice pomaže s čišćenjem rotora od krhotina i nečistoća. Ovakve se turbine često konstruiraju s dvije turbine različitih kapaciteta na istom vratilu, što omogućuje primanje različitih protoka vode [7]. To je postignuto na način da su rotori istih promjera, ali različitih duljina lopatica. Princip rada se može vidjeti na slici 2.6.



*Slika 2.6. Presjek turbine s križnim presjekom [8]*

### 2.1.3. Turgo turbina

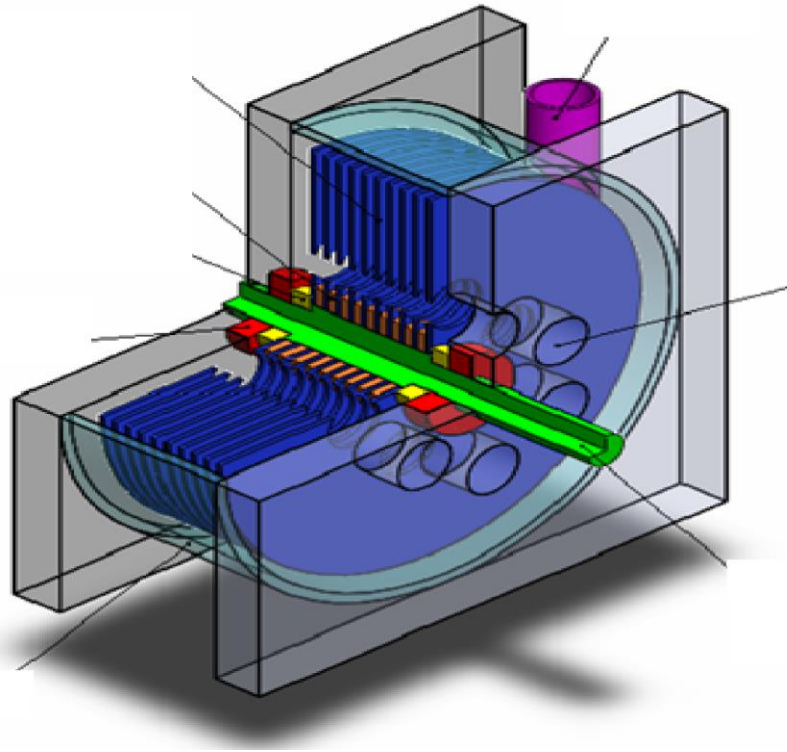
Turgo turbine su akcijske turbine vrlo slične Peltonovim turbinama u svom izgledu i načinu rada, a glavna razlika je to što mlaz u turgo turbini dolazi bočno na rotorske lopatice. One se koriste pri srednjim padovima (od 50 do 250 metara), ali rade pri većim brzinama i protocima vode u usporedbi s Peltonovom turbinom istog promjera. Prednost Turgo turbine naspram Peltonove je njezina cijena te se vrlo često koristi u manjim hidroelektranama gdje ekonomičnost ima prednost nad efikasnošću [9]. Slika 2.7. prikazuje rad turgo turbine.



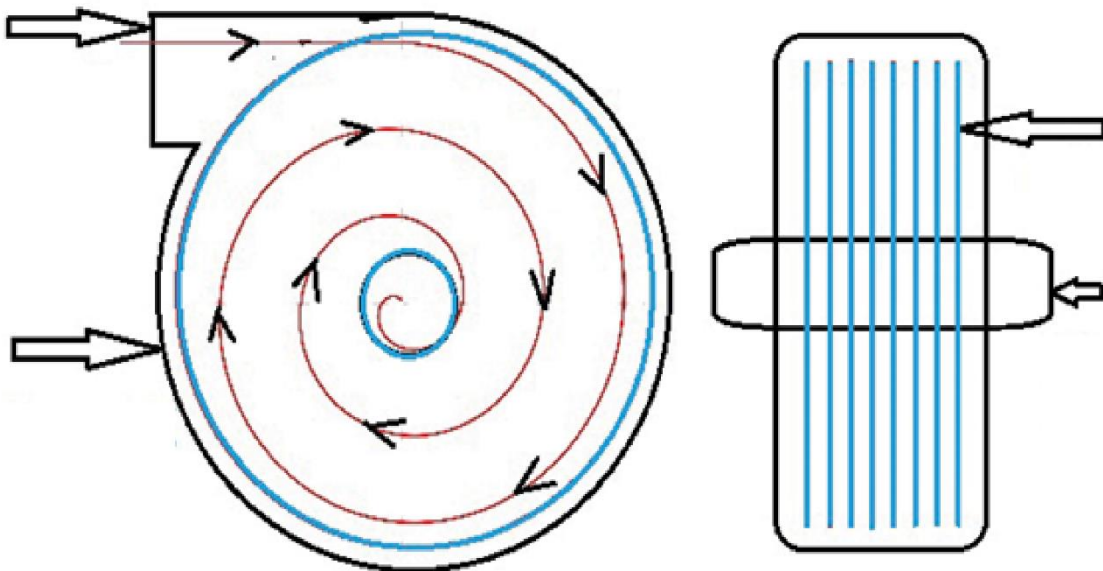
Slika 2.7. Turgo turbina [10]

### 2.1.4. Teslina turbina

Teslina turbina je impulsna turbina koju je izumio Nikola Tesla na početku 20. stoljeća i ona se razlikuje od ostalih turbina jer uopće nema rotorske lopatice u svojoj izradi. Kako rotor nema lopatice, sama konstrukcija je vrlo robusna i čvrsta. Obzirom da ova turbina nema lopatica, koristi se djelovanje graničnih slojeva između fluida i višestrukih vrhova glatkih diskova, koji djeluju kao rotori. Zbog viskoziteta, odnosno trenja fluida, i privlačnih sila slojeva diska granični dijelovi fluida djeluju na diskove. Nažalost Teslin izum nije bio ostvariv u njegovo vrijeme zbog ograničenja materijala koji su bili korišteni u konstrukciji, ali je u današnje vrijeme taj problem nadvladan i njegov izum je primjenjiv [11]. Slike 2.8. i 2.9. prikazuju dijelove Tesline turbine i protok fluidu kroz nju.



Slika 2.8. Konstrukcija Tesline turbine [12]

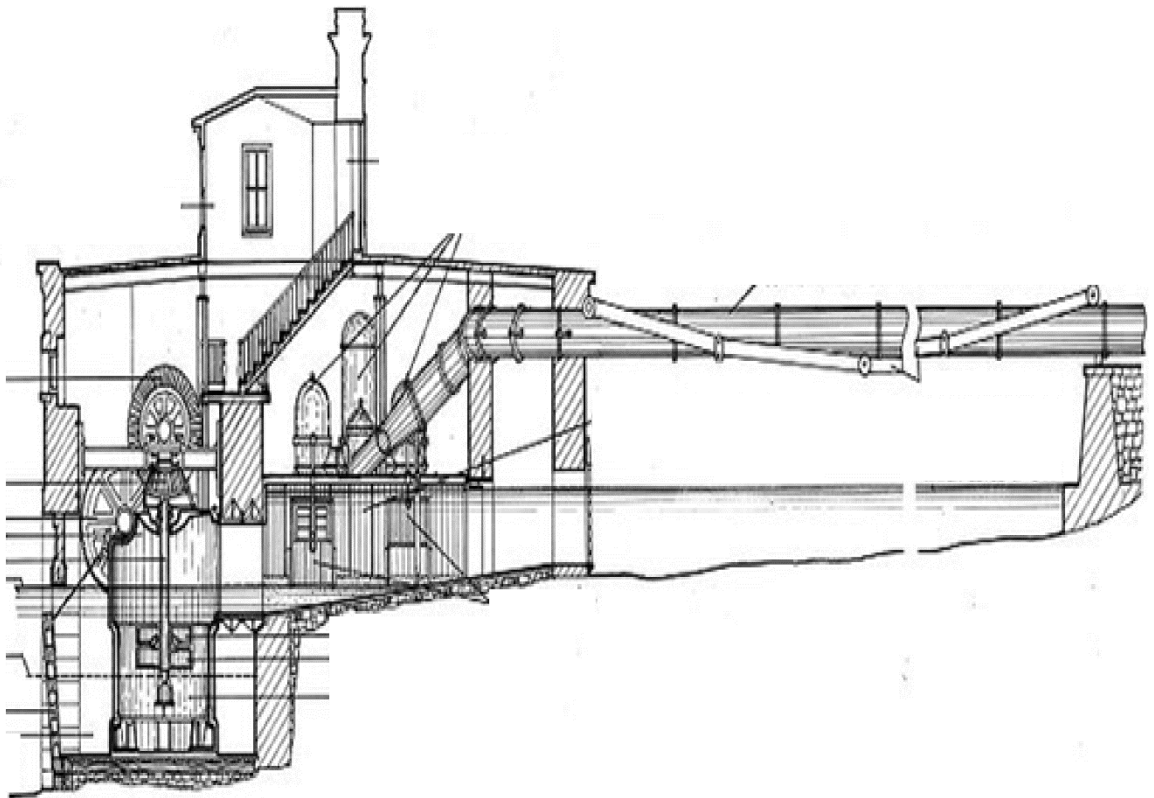


Slika 2.9. Protok fluida kroz Teslinu turbinu [13]



### 2.1.5. Jonval-ova turbina

Jonval-ova turbina je akcijska turbina kod koje voda struji usporedno s vratilom. Kao i kod ostalih akcijskih turbina, mlaz vode prolazi kroz fiksne statorske lopatice koje navode mlaz na rotorske lopatice. Zanimljivo je da je difuzor prvi put iskorišten na ovakvoj vrsti vodne turbine i on omogućuje potpuno iskorištavanje pada vode, iako je rotor postavljen znatno iznad donje razine vode [2]. Slika 2.10. prikazuje Jonval-ovu turbinu koja je bila korištena u komunalnom vodovodu u Fairmount-u.



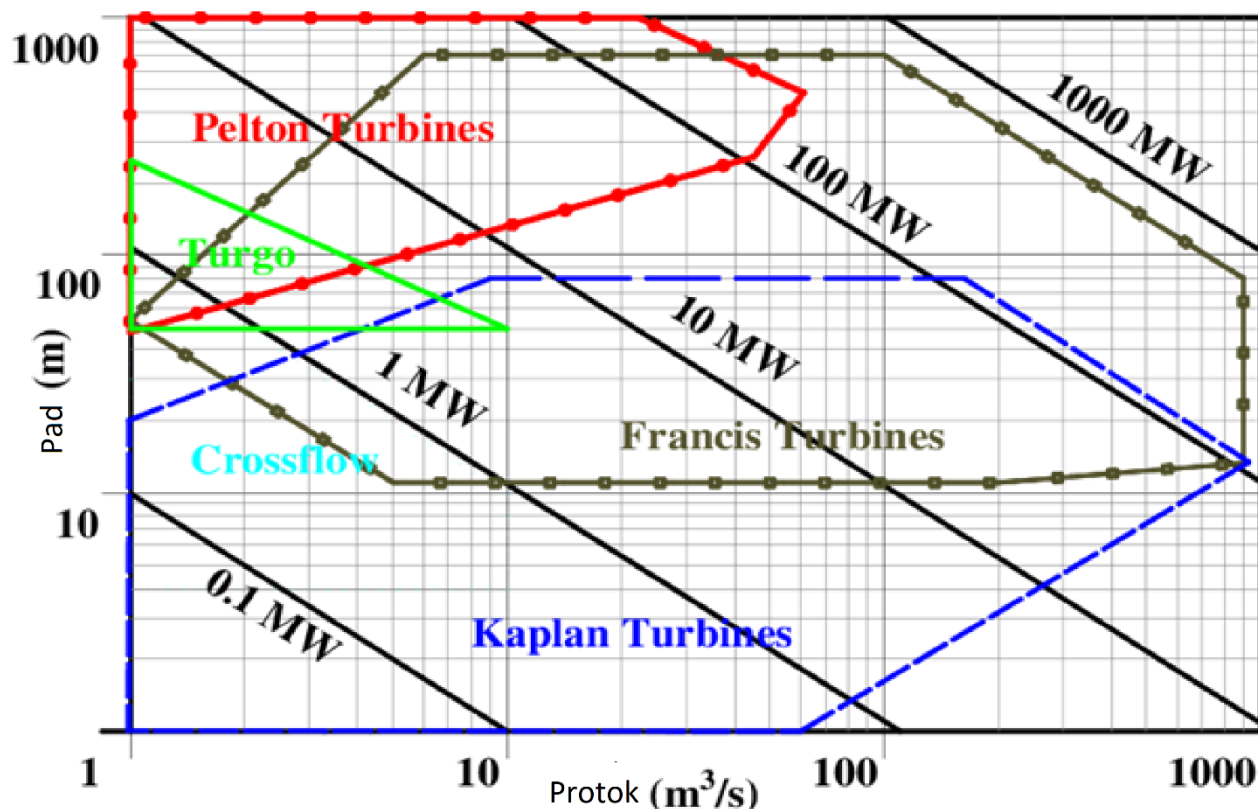
*Slika 2.10. Jonvalova turbina u komunalnom vodovodu Fairmount [14]*

## 2.2. Reakcijske turbine

Za razliku od akcijskih turbina kojima je sveukupni zakretni moment rotora posljedica preusmjeravanja mlaza fluida na rotorskim lopaticama, zakretni moment rotora reakcijske turbine dobiven je djelomično promjenom količine gibanja, a djelomično reakcijskom silom uvjetovane razlikom tlaka, Coriolisovom silom, itd.

Prilazom mlaza fluida na reakcijske turbine mijenja mu se tlak kroz cijelu turbinu, odnosno dolazi do pada tlaka i na statorskim i na rotorskim lopaticama. Kako bi ova vrsta turbina održala tlak fluida, turbine moraju biti u potpunosti uronjene u vodenom toku ili moraju biti u kućištu, dok nekim akcijskim turbinama nije bilo potrebno kućište i kod nekih vrsta nisu sve lopatice bile opterećene u isto vrijeme.

Reaktivne turbine se češće koriste od akcijskih turbina i one se koriste pri niskom ili srednjem hidrostatskom tlaku te pri većim protocima vode. Usporedba padova, brzina protoka i proizvedene energije akcijskih i reakcijskih turbina vidljiva je na slici 2.11.



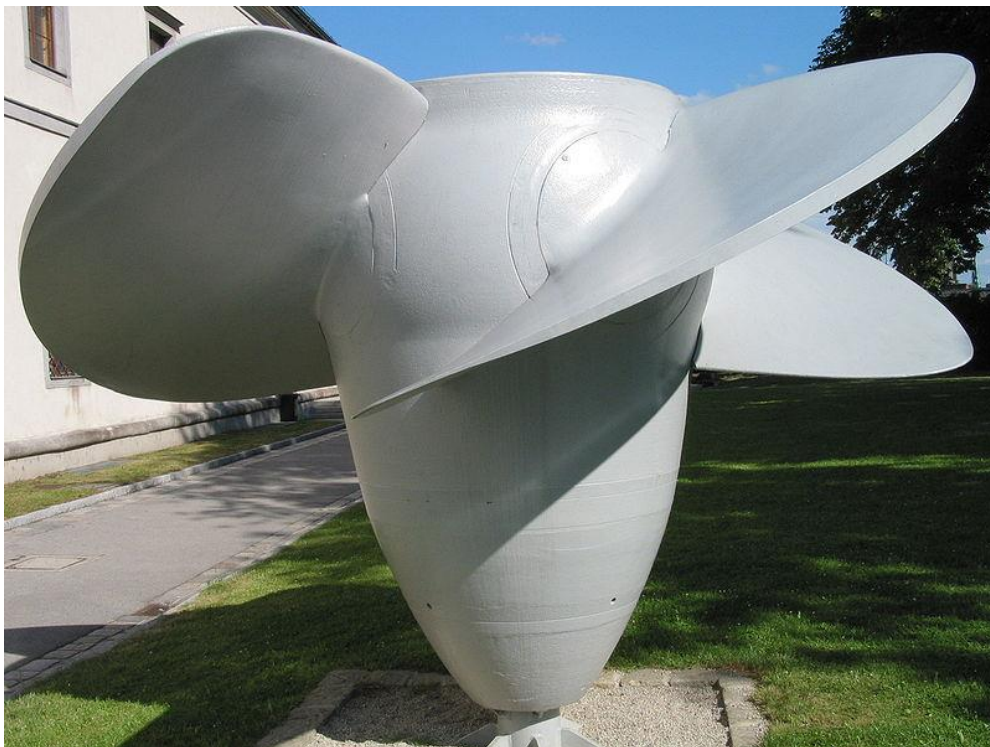
Slika 2.11. Dijagram područja korištenja vodnih turbina [15]

Predstavnici reakcijskih turbina su sljedeće turbine:

- Kaplan-ova turbina
- Francis-ova turbina
- Arhimedov puž

### 2.2.1. Kaplan-ova turbina

Ova vrsta turbine je reakcijska vrsta vodne turbine propeleranog izgleda, ali kompleksnije konstrukcije. Na kućištu se nalaze predprivodeće lopatice kojih obično ima od 10 do 12 i one su nepomične te privodeće lopatice kojih ima između 20 i 32, a one su pomične te se pomoću njih vrši regulacija protoka vode prema rotoru. Rotorskih lopatica ima od 4 do 8, ovisno o padu vode (manji pad vode znači manji broj lopatica) te one također mogu biti pomične. U slučaju kada su i rotorske lopatice pomične, moguća je dvostruka regulacija protoka i to omogućava ovakvim vrstama turbine vrlo visoku efikasnost čak do 90%, u širokom radnom području. Odnos između privodećih i rotorskih lopatica regulira se preko posebnog uređaja pod imenom kulisa [2]. Na slici 2.11. je prikazana Kaplan-ova turbina s mogućnošću zakretanja rotorskih lopatica.



*Slika 2.12. Kaplan-ova turbina s pomičnim lopaticama [16]*

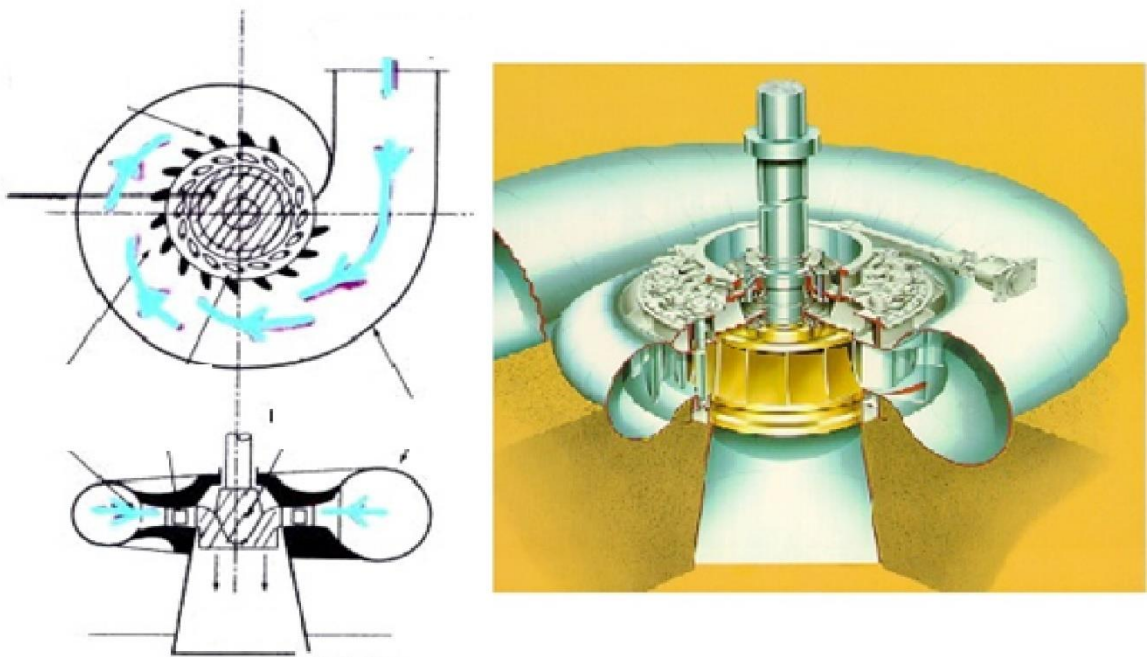
Kaplan-ove se turbine koriste pri malim padovima vode (od nekoliko metara do 70 metara) i pri vrlo visokim protocima. Često se zbog toga ugrađuju na ravninskim područjima s rijekama koje mogu osigurati visoki protok kroz cijelu godinu te se obično grade brane koje osiguravaju potrebni pad.

Kod Kaplan-ovih turbina odvod vode se vrši pomoću difuzora koji također, smanjenjem izlazne energije, povećava učinkovitost postrojenja.

### 2.2.2. Francis-ova turbina

Francis-ove turbine su najrasprostranjenije vrste turbina koje se koriste u hidroelektranama diljem svijeta. Razlog njihove popularnosti je veliki radni raspon ovih vrsta turbina, s padom od 20 metara pa sve do 700 metara, visok raspon proizvedive energije od svega nekoliko kW, pa do 750 MW te njihova vrlo visoka efikasnost koja može prekoračiti 90%.

Kod Francis-ovih turbina voda se privodi pomoću tlačnog cijevovoda, ona ulazi u spiralu koja služi za ravnomjerno raspoređivanje po obodu rotora. Regulacija protoka se vrši pomoću privodećih lopatica koje imaju mogućnost zakretanja, kao i kod Kaplan-ove turbine, koja stvara mogućnost regulacije snage turbine. Nakon izlaska iz rotora, koristi se difuzor za odvod vode te on smanjuje izlazne gubitke u turbini povezane s kinetičkom energijom vode [2].



Slika 2.13. Presjek i dijelovi Francis-ove turbine [17]

### 2.2.3. Arhimedov puž

Arhimedov puž je vrlo jednostavna i jeftina reaktivna turbina koja radi na suprotnom principu Arhimedovog vijka. Arhimedov vijak podiže vodu s niže razine na višu uz utrošak energije, Arhimedov puž se koristi prirodnim protokom vode s više razine na nižu, prilikom koje pretvara potencijalnu energiju u kinetičku koja kasnije služi za stvaranje električne energije.

Arhimedov puž se koristi pri malenim padovima (od 1 metra do 10 metara) te pri manjim protocima što stvara niske okretaje turbine. Zbog tih karakteristika, ova vrsta turbine ne proizvodi velike količine energije (do 500 kW), ali zato ima najmanji učinak na prirodu i najmanju štetnost na ribe koje imaju stanište u rijeci na kojoj se radi hidroelektrana s Arhimedovim pužem [18]. Na slici 2.14. se može vidjeti takva hidroelektrana u Wales-u.



*Slika 2.14. HE s dva Arhimedova puža [19]*

### 3. DIFUZOR

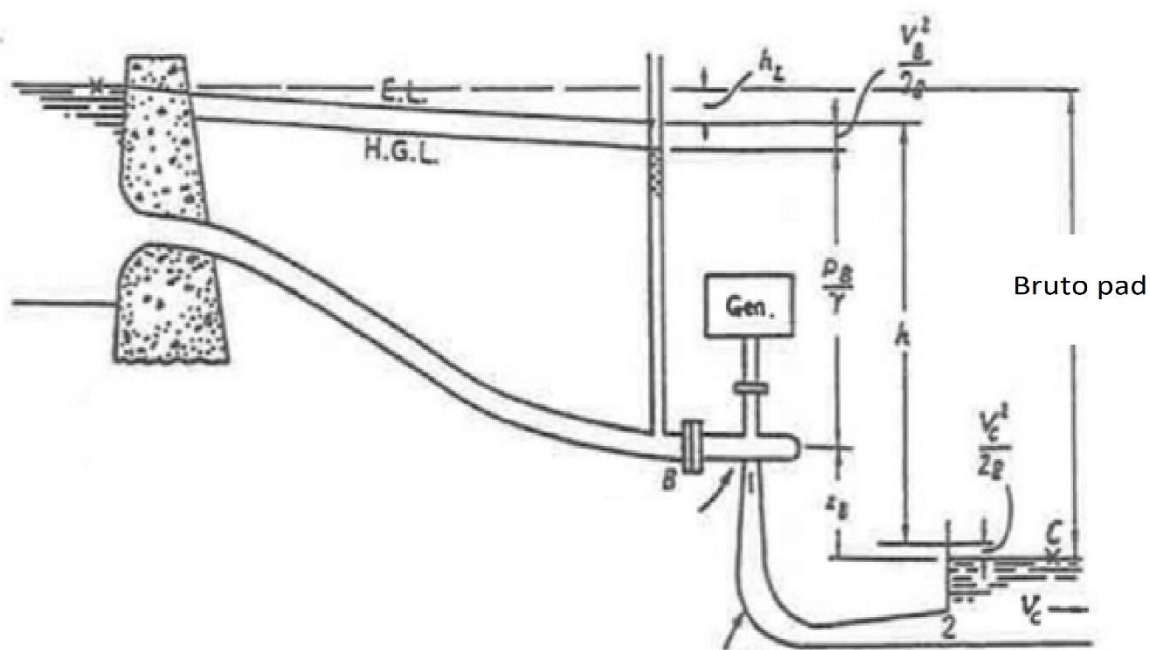
Difuzor ili odsisna cijev je komponenta bilo koje hidroelektrane s reaktivnom vodom turbinom te ovisno o tipu turbine koji se koristi, koristiti će se jedna od različitih izvedba difuzora o kojima će se govoriti dalje u ovom poglavlju. Difuzor kao dio postrojenja koji se nadovezuje na izlaz turbine ima dvije glavne zadaće, a one su:

- Omogućavanje neprekinutog toka vode od izlaza iz turbine do donje vode
- Smanjenje gubitaka izlazne energije vode

Zbog svoje prve funkcije, difuzor omogućava postavljanju same turbine iznad razine donje vode i to bez gubitaka raspoloživog tlaka. Sama posljedica postavljanja turbine iznad donje razine vode je pad tlaka na ulaznom presjeku difuzora te ovisno o visini turbine naspram razine donje vode, pad tlaka će biti veći ili manji (veća razlika između visine turbine i donje vode pridonosi većem padu tlaka). Turbina može biti postavljena na različitim visinama između gornje i donje vode bez utjecaja na raspoloživi neto pad vode. Bruto pad vode se može definirati kao razlika između gornje i donje razine vode, a neto pad je definiran kao bruto pad od kojeg su oduzeti gubici dovoda i odvoda od vodne turbine [20].

Svojom drugom funkcijom smanjenja gubitaka izlazne energije vode, difuzor povećava učinkovitost cjelokupnog postrojenja. Difuzor smanjuje kinetičku energiju vode tako što joj smanjuje brzinu i povećava tlak njezinim protokom kroz difuzor. Razlog zašto se to događa je sama geometrija difuzora, odnosno taj se efekt postiže povećanjem površine poprečnog presjeka difuzora od ulaznog presjeka, do izlaznog presjeka [2]. O tome će se pričati malo detaljnije dalje u poglavlju.

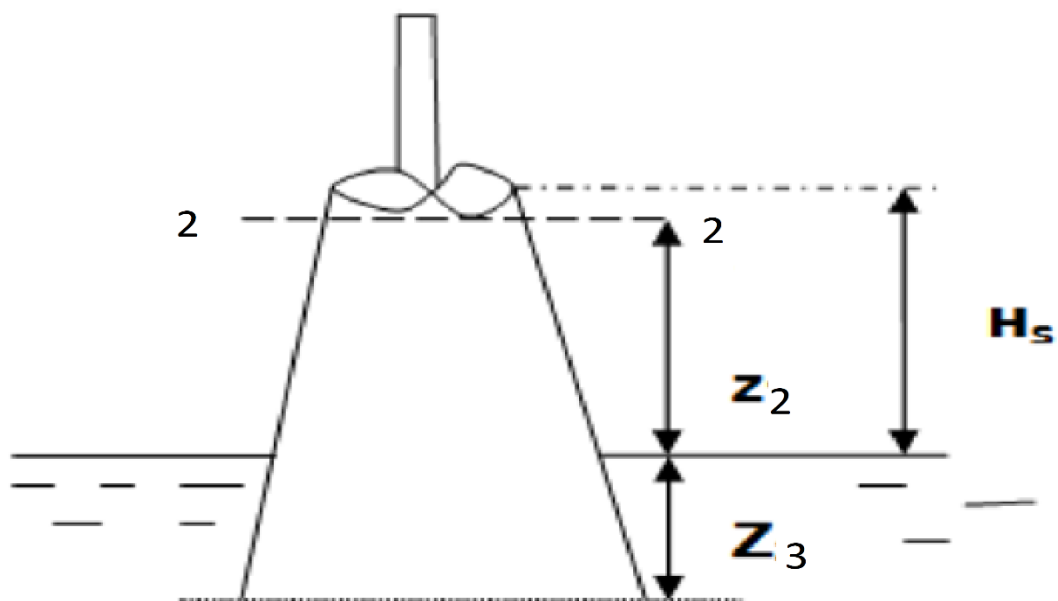
Sama vrsta difuzora te njegove dimenzije su najčešće definirane od strane proizvođača vodne turbine. Najčešći materijali za izradu difuzora su čelik i beton. Čelik se najčešće koristi za vertikalni dio difuzora, dok se beton najčešće koristi za koljeno i horizontalni dio difuzora.



Slika 3.1. Bruto pad [20]

### 3.1. Princip rada difuzora

Princip rada difuzora može se opisati pomoću korištenja Bernoullijeve jednadžbe kroz različite presjeka kako je prikazano na slici 3.2. i s jednadžbom (3.1.).



Slika 3.2. Shematski prikaz difuzora [21]

$$\frac{p_2}{\rho g} = \frac{p_{atm}}{\rho g} - [H_s + (\frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} - \frac{\alpha_3 v_3^2}{2g} - h_{gub,dif})] \quad (3.1.)$$

gdje je:

$p_2$  – tlak na ulaznom presjeku difuzora [Pa]

$p_{atm}$  – atmosferski tlak [Pa]

$H_s$  – visina postavljanja turbine (otprilike jednaka veličini  $z_1$ ) [m]

$h_{gub,dif}$  – gubitak pada vode [m]

$v_2$  – brzina na ulaznom presjeku difuzora [m/s]

$v_3$  – brzina na izlaznom presjeku difuzora [m/s]

$\alpha_2$  – faktor korekcije brzine na ulaznom presjeku difuzora

$\alpha_3$  - faktor korekcije brzine na izlaznom presjeku difuzora

$\rho$  – gustoća vode [kg/m<sup>3</sup>]

$g$  – ubrzanje sile teže [m/s<sup>2</sup>]

Iz jednadžbe (3.1.) može se vidjeti da difuzori stvaraju potlak ispod rotora turbine, na slici 21. to je presjek 1-1, koji sama turbina može iskoristiti. Taj potlak se sastoji od 2 člana, pada statičkog tlaka ( $H_s$ ) i pada dinamičkog tlaka ( $\frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} - \frac{\alpha_3 v_3^2}{2g} - h_f$ ). Pad statičkog tlaka je neovisan o protoku, dok je pad dinamičkog tlaka ovisan o protoku. Pad dinamičkog tlaka se povećava s povećanjem kuta difuzora te s povećanjem duljine difuzora. U oba se slučaja povećavaju i hidraulički gubici difuzora te je zaključno s tim, za stvaranje efikasnog difuzora potreban optimalni kut i duljina difuzora s kojima će pad tlaka nakon rotora biti maksimalan [21].

Svojstva difuzora se obično opisuju pomoću četiri jednadžbe performanse, a one su [21]:

- Stvarni oporavak tlaka (3.2.)
- Idealni oporavak tlaka (3.3.)
- Efikasnost difuzora (3.4.)
- Faktor gubitka (3.5.)



$$C_p = \frac{P_3 - P_2}{\frac{\alpha_2 v_2^2}{\rho}} \quad (3.2.)$$

gdje je:

$C_p$  - Stvarni oporavak tlaka

$p_2$  – tlak na ulaznom presjeku difuzora [Pa]

$p_3$  – tlak na izlaznom presjeku difuzora [Pa]

$\rho$  – gustoća fluida [kg/m<sup>3</sup>]

$\alpha_2$  - faktor korekcije brzine na ulaznom presjeku difuzora

$v_2$  – brzina na ulaznom presjeku difuzora [m/s]

$$C_{pi} = 1 - \frac{\alpha_3 v_3^2}{\alpha_2 v_2^2} = 1 - \frac{\alpha_3 A_2^2}{\alpha_2 A_3^2} \quad (3.3.)$$

gdje je:

$C_{pi}$  - Idealni oporavak tlaka

$\alpha_2$  - faktor korekcije brzine na ulaznom presjeku difuzora

$\alpha_3$  - faktor korekcije brzine na izlaznom presjeku difuzora

$v_2$  – brzina na ulaznom presjeku difuzora [m/s]

$v_3$  – brzina na izlaznom presjeku difuzora [m/s]

$A_2$  – površina ulaznog poprečnog presjeka [m<sup>2</sup>]

$A_3$  – površina izlaznog poprečnog presjeka [m<sup>2</sup>]

$$\eta_{cp} = \frac{C_p}{C_{pi}} \quad (3.4.)$$

gdje je:

$\eta_{cp}$  – efikasnost difuzora

$C_p$  - Stvarni oporavak tlaka

$C_{pi}$  - Idealni oporavak tlaka

$$\zeta = C_{pi} - C_p \quad (3.5.)$$

gdje je:

$\zeta$  – faktor gubitka

$C_{pi}$  - Idealni oporavak tlaka

$C_p$  - Stvarni oporavak tlaka

### 3.2. Gubici u difuzoru

Gubici kod vodnih turbina se dijele na tri različite vrste gubitaka i to na hidrauličke gubitke, volumetričke gubitke i mehaničke gubitke. Gubici u difuzoru se smatraju hidrauličkim gubicima i oni su prisutni kao posljedica strujanja fluida te ih nije moguće izbjeći. Čak iako ih je nemoguće potpuno izbjeći, moguće ih je svesti na minimalnu ili neku prihvatljivu razinu pomoću pravilne konstrukcije hidrauličkih dijelova. Hidraulički gubici se dijele na gubitke trenja i na gubitke uslijed odvajanja struje, odnosno to su sudarni gubici. Gubici trenja su neizbježni, ali kako je rečeno prije, pravilnom konstrukcijom je moguće izbjeći gubitke odvajanja [2].

Gubitke u difuzoru je moguće opisati sljedećim izrazom [2]:

$$H_{gub,dif} = k_{dif} \frac{v_2^2}{2g} \quad (3.6.)$$

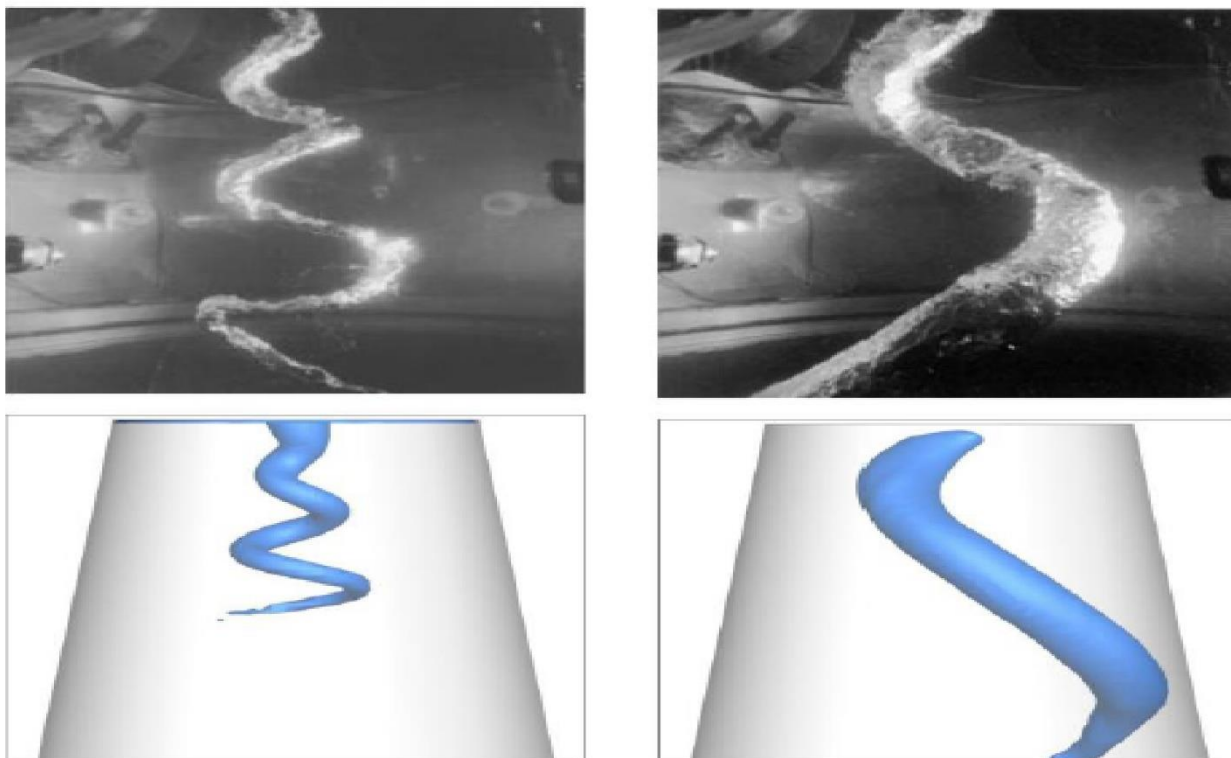
gdje je:

$H_{gub,dif}$  – gubici u difuzoru [m]

$k_{dif}$  – koeficijent lokalnog otpora difuzora

$v_2$  – brzina na ulaznom presjeku difuzora [m/s]

$g$  – ubrzanje sile teže [m/s<sup>2</sup>]

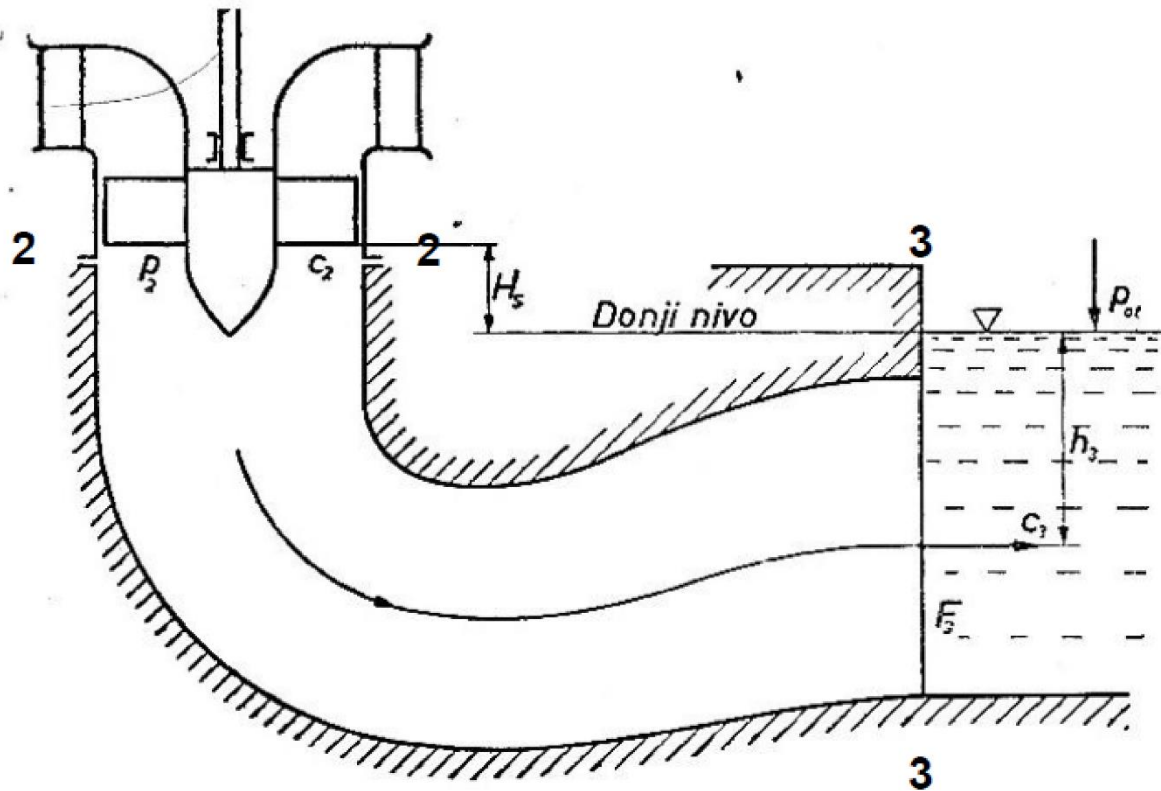


*Slika 3.3. Kavitacijski vrtlozi [2]*

### **3.3. Analiza smanjenja izlaznih gubitaka korištenjem difuzora**

Kako je rečeno u uvodnom dijelu ovog poglavlja, smanjenje izlaznih gubitaka nastaje djelomično zbog iskorištavanja ukupnog pada vode. Pošto je sama turbina postavljena iznad donje razine vode, potreban je difuzor za stvaranje neprekinutog toka vode te je rezultat toga iskorištavanje ukupnog pada vode. Drugi dio smanjenja gubitaka proizlazi iz oduzimanja kinetičke energije vode u obliku brzine i to se postiže povećanjem površine poprečnog presjeka difuzora prema izlaznom presjeku, odnosno voda ima najmanju brzinu na samom izlazu iz difuzora.

Za izvod same analize, potrebno je definirati dva presjeka. Na slici 3.4. su definirani ulazni i izlazni presjek, kao presjek 2-2 i presjek 3-3.



Slika 3.4. Skica difuzora s označenim presjecima [2]

Presjek 2-2 je presjek koji označava ulazni presjek difuzora, odnosno izlazni presjek turbine, a presjek 3-3 označava izlazni presjek difuzora. Raspisivanjem Bernoullijeve jednadžbe za presjek 2-2 dobiva se izraz za specifičnu energiju vode za taj presjek:

$$e_2 = \frac{v_2^2}{2} + \frac{p_{at}}{\rho} + g \cdot H_s \quad (3.7.)$$

gdje je:

$e_2$  – specifična energija na ulaznom presjeku [J/kg]

$v_2$  – brzina na ulaznom presjeku difuzora [m/s]

$p_{at}$  – atmosferski tlak [Pa]

$\rho$  – gustoća vode [kg/m<sup>3</sup>]

$g$  – ubrzanje sile teže [m/s<sup>2</sup>]

$H_s$  – visina postavljanja turbine iznad donje razine vode [m]

Raspisivanjem Bernoullijeve jednadžbe za presjek 3-3 dobivamo sličnu, ali malo drugačiju jednadžbu:

$$e_3 = \frac{v_3^2}{2} + \frac{p_{3sr}}{\rho} - g \cdot z_3 \quad (3.8.)$$

gdje je:

$e_3$  – specifična energija na izlaznom presjeku [J/kg]

$v_3$  – brzina na izlaznom presjeku difuzora [m/s]

$p_{3sr}$  – tlak na sredini presjeka 3-3 [Pa]

$\rho$  – gustoća vode [kg/m<sup>3</sup>]

$g$  – ubrzanje sile teže [m/s<sup>2</sup>]

$z_3$  – dubina sredine presjeka 3-3 ispod donje razine vode [m]

Pošto je:

$$p_3 = p_{at} + \rho \cdot g \cdot z_3 \quad (3.9.)$$

Te uvrštavanjem jednadžbe (3.9.) u jednadžbu (3.8.) dobiva se:

$$e_3 = \frac{v_3^2}{2} + \frac{p_{at}}{\rho} \quad (3.10.)$$

Razlika izlazne energije s upotrebom difuzora dobiva se oduzimanjem jednadžbe (3.10.) od jednadžbe (3.7.), uzimajući u obzir dodatni gubitak koji se javlja korištenjem difuzora:

$$\Delta e = e_2 - e_1 - e_{gub,dif}$$

$$\Delta e = g \cdot H_s + \frac{v_2^2 - v_3^2}{2} - g \cdot h_{gub,dif} \quad (3.11.)$$

$$\Delta e = g \cdot H_s + \frac{Q^2}{2} \cdot \left( \frac{1}{A_2^2} - \frac{1}{A_3^2} \right) - g \cdot h_{gub,dif} \quad (3.12.)$$

gdje je:

$\Delta e$  – razlika specifičnih energija [J/kg]

$g$  – ubrzanje sile teže [m/s<sup>2</sup>]

$H_s$  – visina postavljanja turbine iznad donje razine vode [m]

$Q$  – volumni protok vode [m<sup>3</sup>/s]

$A_2$  – površina ulaznog poprečnog presjeka [ $m^2$ ]

$A_3$  – površina izlaznog poprečnog presjeka [ $m^2$ ]

$h_{gub,dif}$  – visina gubitaka difuzora [m]

Možemo vidjeti da se jednačbe (3.11.) i (3.12.) sastoje od tri člana. Prvi im je član ( $g \cdot H_s$ ) i njega se može tumačiti kao ušteda energije zbog iskorištenja ukupnog raspoloživog pada (u slučaju bez difuzora, nije iskorišten ukupni raspoloživi pad, jer se turbina nalazi iznad razine donje vode). Drugi član jednačbi predstavlja istu stvar, samo pokazanu na dva različita načina. Kod jednačbe (3.11.), član  $\left(\frac{v_2^2 - v_3^2}{2}\right)$  predstavlja uštedu energije na račun smanjenja brzine izlazne vode te je taj član uvijek pozitivan. Kod jednačbe (3.12.), član  $\left(\frac{Q^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{A_2^2} - \frac{1}{A_3^2}\right)\right)$  također prikazuje uštedu energije pri povećanju izlaznog presjeka difuzora u odnosu na ulazni te je i taj član pozitivan. Oba člana zapravo prikazuju istu uštedu energije, razlika je samo u načinu zapisivanja, jer brzina fluida ovisi o poprečnom presjeku difuzora. Što je izlazni presjek veći naspram ulaznog presjeka, to je će biti i manja izlazna brzina naspram ulaznoj brzini, što nam označava veću uštedu energije. Idealni slučaj bi bio da je izlani poprečni presjek beskonačno velik, što bi značilo da bi izlazna brzina bila jednaka nuli. Treći član ( $g \cdot h_{gub,dif}$ ) predstavlja dodatne, neizbježne gubitke koji nastaju dodavanjem difuzora [2].

Raspisivanjem Bernoullijeve jednačbe od presjeka 2-2 do presjeka 3-3 moguće je dokazati postojanje podtlaka u presjeku 2-2:

$$\frac{v_2^2}{2 \cdot g} + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + H_s = \frac{v_3^2}{2 \cdot g} + \frac{p_{at}}{\rho \cdot g} + h_{gub,dif}$$

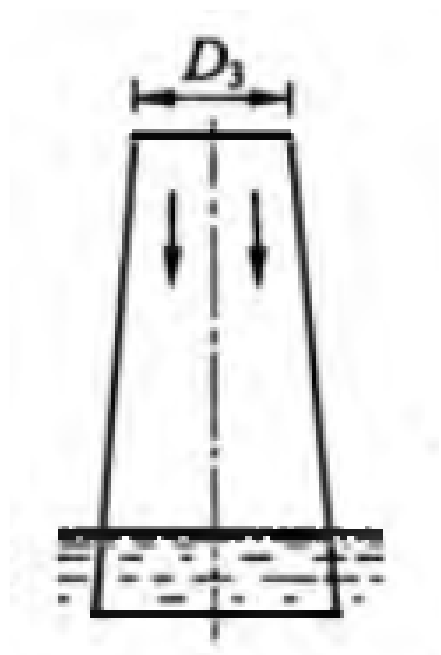
$$\frac{p_2 - p_{at}}{\rho \cdot g} = -\left(H_s + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} - \frac{v_3^2}{2 \cdot g} - h_{gub,dif}\right) \quad (3.13.)$$

U jednačbi (3.13.) može se vidjeti da je  $H_s$  uvijek veći od nule, pošto je turbina iznad donje razine vode te da je rezultat člana  $\left(\frac{v_2^2}{2 \cdot g} - \frac{v_3^2}{2 \cdot g}\right)$  također uvijek veći od nule, pošto je brzina na ulaznom presjeku uvijek veća od brzine na izlaznom presjeku difuzora. Iz toga se da vidjeti da je rezultat razlike tlaka uvijek ( $p_2 - p_{at}$ ) manji od nule, odnosno da u presjeku 2-2 vlada podtlak. Naposljetku, može se zaključiti da povećanje iskoristivosti ide na račun smanjenja tlaka u presjeku 2-2, čega se treba pripaziti, jer postoji opasnost od nastanka kavitacije ako tlak padne ispod kritičnog [2].

### 3.4. Vrste difuzora

#### 3.4.1 Ravni konični difuzor

Ravni konični difuzor je najjednostavnija vrsta difuzora koja odvodi vodu vertikalno prema dolje, do donje vode. Ovakva je vrsta difuzora zapravo cijev koja je vertikalno postavljena i čija se površina poprečnog presjeka linearno povećava od ulaznog presjeka, pa sve do izlaznog presjeka. Brzina strujanja vode kroz ovakvu vrstu difuzora je uniformna, dok su gubici nastali zbog trenja najmanji (u usporedbi s ostalim vrstama difuzora). Ovakva se vrsta difuzora primarno koristi kod malih vodnih turbina, ali se ponekad koriste i kod velikih vodnih turbina koje imaju horizontalno postavljeno vratilo. Razlog zašto se ravni konični difuzor ne koristi previše kod većih turbina je zbog velikih hidrauličkih gubitaka koji nastaju. Ravni konični difuzor može se vidjeti na slici 3.5.

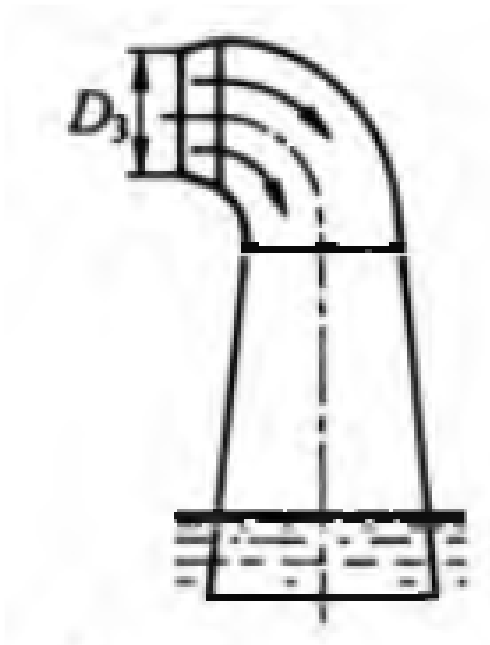


Slika 3.5. Ravni konični difuzor [22]

#### 3.4.2 Savinuti konični difuzor

Savinuti konični difuzor je sličan ravnom koničnom difuzoru te je jedina razlika što osim ravnog koničnog dijela ima i savinuti dio kružnog poprečnog presjeka koji je zapravo ulazni presjek ovakvog difuzora. Kao i kod koničnog dijela, savinutom kružnom dijelu se također proširuje poprečni presjek od ulaznog do izlaznog presjeka. Savinuti konični difuzori se koriste kod malih vodnih turbina s horizontalno postavljenim vratilom. Osim toga, razlika ovakvog

difuzora naspram ravnom koničnog difuzora je ta što kod ovake vrste difuzora dolazi do neuniformne brzine strujanja vode te zbog toga dolazi i do većih gubitaka trenja. Savinuti konični difuzor je prikazan na slici 3.6.

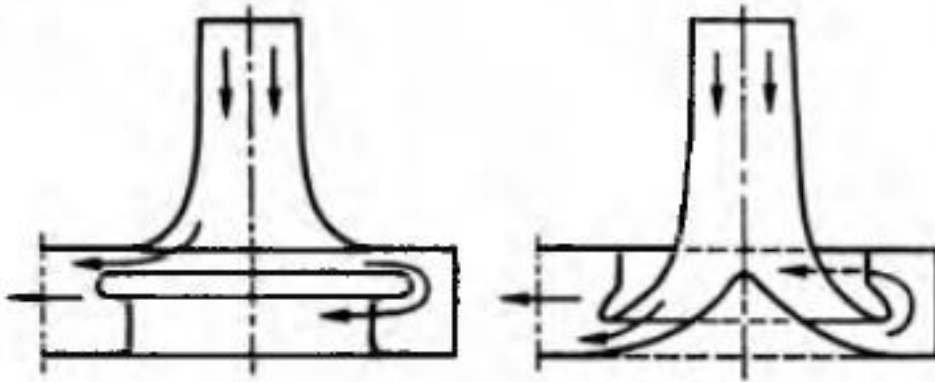


Slika 3.6. Savinuti konični difuzor [22]

#### 3.4.3. Obični prošireni difuzor

Obični prošireni difuzor je zapravo kraća verzija ravnog koničnog difuzora kojem se poprečni presjek ne povećava linearno, već se kod ove vrste difuzora povećava eksponencijalno. Ova se vrsta difuzora koristi umjesto ravnog koničnog difuzora u slučajevima kad je kut difuzora  $\alpha$  veći od  $8^\circ$  i kada je potrebno ugraditi kratki difuzor s malim hidrauličkim gubicima. U posebnim slučajevima se namjerno puštaju male količine zraka u središnji dio difuzora kako bi se postigao stabilniji rad s manje vibracija. Na slici 3.7. prikazane su dvije vrste običnog proširenog difuzora.

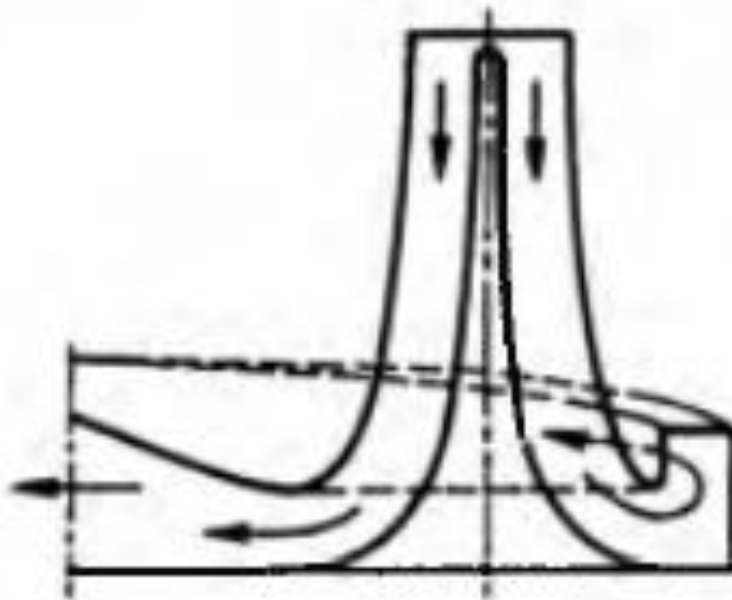




Slika 3.7. Obični prošireni difuzor [22]

#### 3.4.4. Moody-ev difuzor

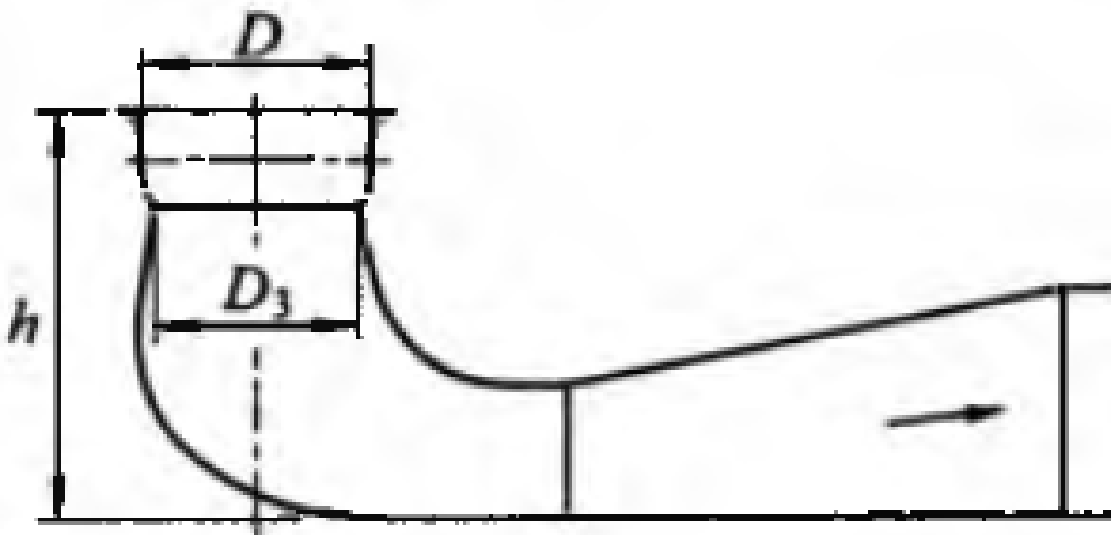
Moody-ev difuzor ili difuzor s razdvajanjem toka vode je difuzor koji ima jedan ulazni presjek, ali mu je zato izlazni presjek podijeljen u dva dijela. Kod ovakvih vrsta difuzora središnji stožac difuzora dolazi odmah nakon rotora turbine, što čini čvrstu jezgru kroz cijeli difuzor, dok je kod nekih središnji stožac postavljen niže. Takva konstrukcija s čvrstom jezgrom smanjuje vrtloženje vode koje nastaje na ulazu u difuzor. Ova je vrsta difuzora prikazana na slici 3.8.



Slika 3.8. Moody-ev difuzor [22]

### 3.4.5. Difuzor s koljenom

Difuzor s koljenom je difuzor koji se sastoji od dva dijela, od vertikalnog dijela koji čini ulazni presjek i horizontalnog dijela koji naposljetku čini izlazni presjek. Vertikalni dio difuzora s koljenom je po izvedbi sličan ravnom koničnom difuzoru i pošto mu se površina poprečnog presjeka povećava od ulaznog do izlaznog, u njemu dolazi do djelomičnog pada brzine. Koljenasti dio ovakvog difuzora služi za promjenu smjera vode iz vertikalnog u horizontalni smjer sa zakretanjem pod kutom od  $90^\circ$ . Horizontalni dio je obično izveden s pravokutnim poprečnim presjekom čija se površina također povećava prema izlaznom presjeku. Ovakav se difuzor postavlja na manju dubinu od ravnog koničnog difuzora što doprinosi smanjenju radova i troškova. Učinkovitost difuzora s koljenom može dostići i 75%. Ovakav je difuzor prikazan na slici 3.9.



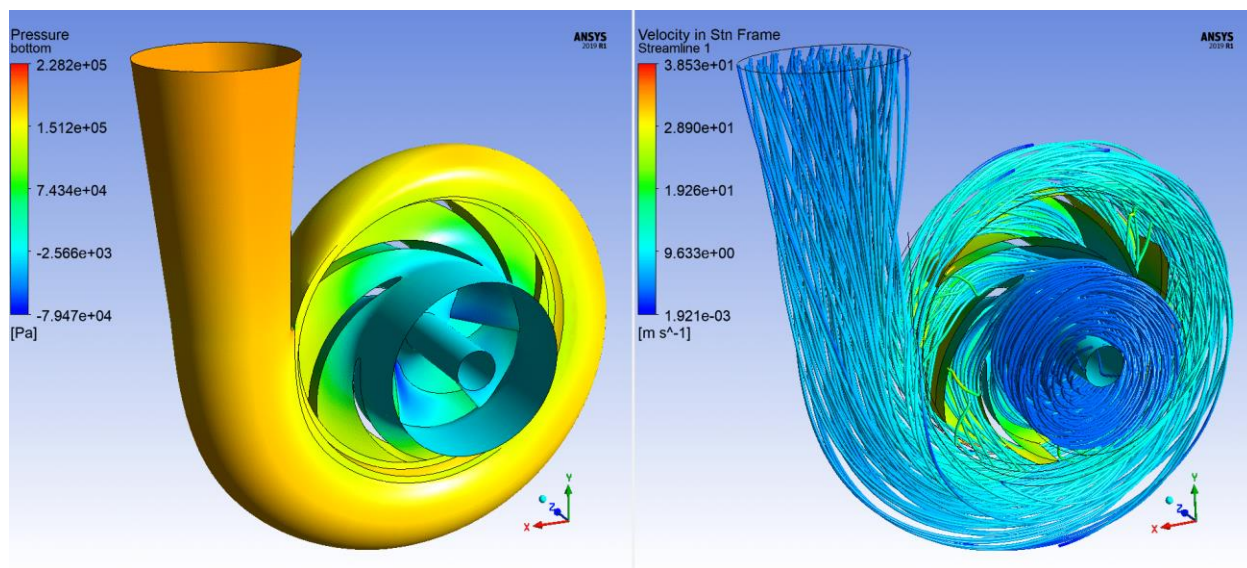
Slika 3.9. Difuzor s koljenom [22]

## 4. ANSYS FLUENT

Ansyes je Američka tvrtka koja razvija CAE (Compture-Aided Engineering) računalne programe koji potpomažu inženjerima i dizajnerima pri optimiziranju razvojnog procesa proizvoda u raznim industrijama, među značajnijima su avio industrija, automobilska industrija, biomedicina, prerađivačka i elektronička industrija. Funkcija tih programa je da simuliraju kako će se proizvod ponašati i kako će funkcionirati u stvarnom radu.

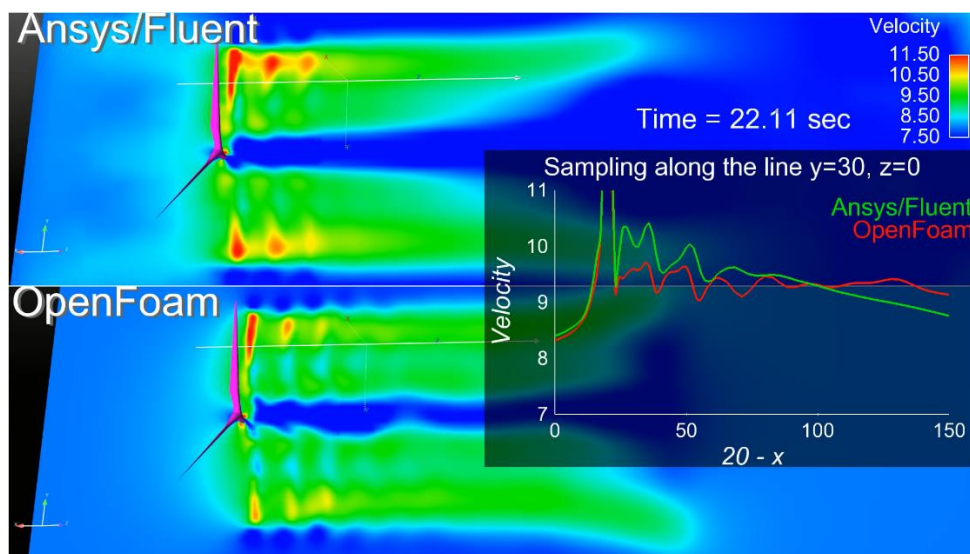
Ansyes je razvio mnogo računalnih programa, svaki sa različitim fokusom simuliranja. Neki od brojnih programa koji se mogu navesti su: Ansyes Lumerical, Ansyes Sound, Ansyes Heat, Ansyes Exalto, Ansyes HFSS itd.

Ovo su samo neki od mnogih programa koji se koriste u raznim industrijama, a za ovaj završni rad, korišten je program Ansyes Fluent, pomoću kojeg se odradio cijelokupni zadatak završnog rada. Slika 4.1. je prikaz rezultata dobivenih pomoću programa Ansyes Fluent.

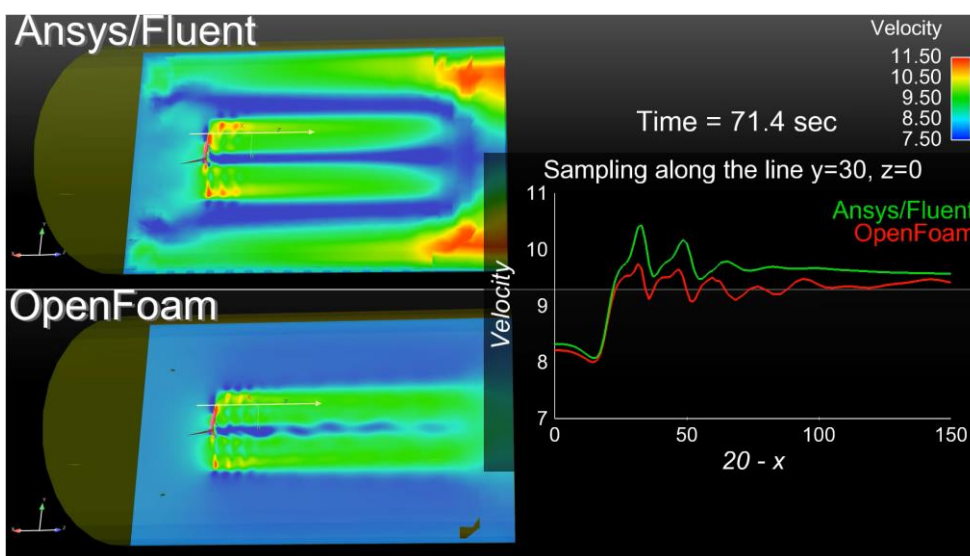


Slika 4.1. Protok fluida kroz spiralu turbine u programu Ansyes Fluent [25]

Ovaj je program jedan od komercijalnih računalnih programa čiji je zadatak simulacija fluida koji su trenutno na tržištu (osim Ansys Fluent-a, također se koriste i Ansys CFX, Star-CCM+ itd.). Prednost Ansys Fluent-a je njegova jednostavnost i „user-friendly“ sučelje, ali nedostatak mu je u odnosu na besplatne programe to što je sam program dosta skup. S druge strane postoje besplatni programi, kao što je OpenFOAM. Iako su oni besplatni, potrebno je znanje programiranja za njihovo korištenje. Slike 4.2. i 4.3. nam prikazuju razlike OpenFOAM-a i Ansys Fluent-a tokom simulacije, u ovom slučaju, rotacije vjetroagregata.

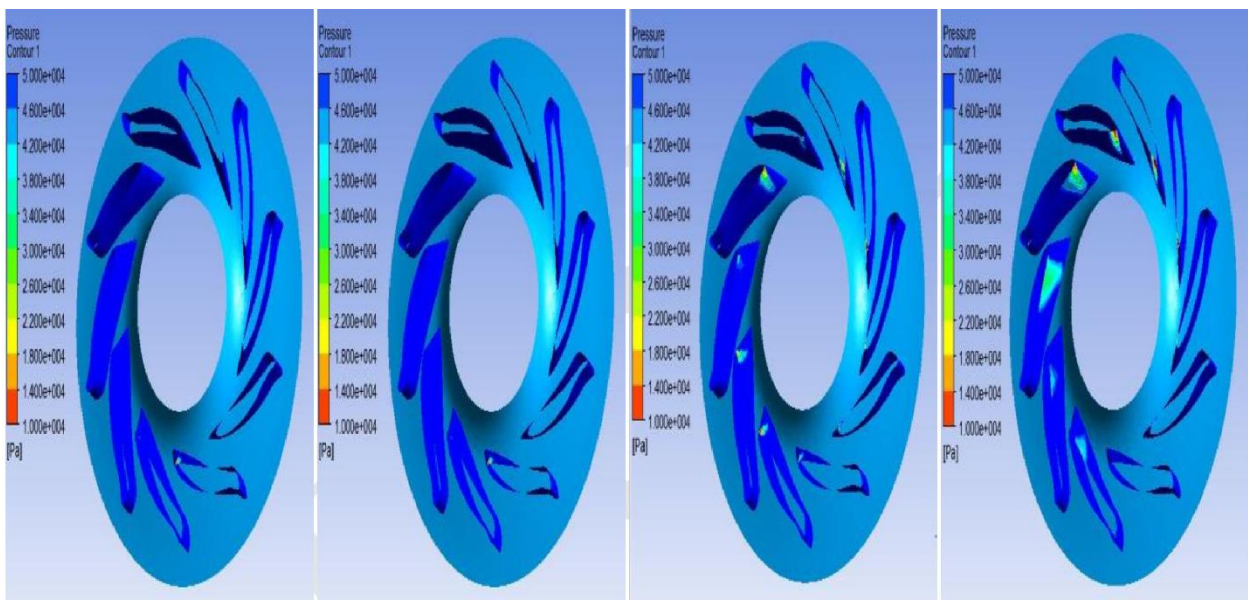


Slika 4.2. Razlike simulacije Ansys Fluent-a i OpenFOAM-a [26]



Slika 4.3. Razlike simulacije Ansys Fluent-a i OpenFOAM-a [26]

Ansyz Fluent nam omogućuju alternativu modelskim testiranjima u bazenima ili zračnim tunelima. Modelska testiranja se i danas koriste, a njihovi su najveći nedostaci troškovi izrade modela i nemogućnost lagane i brze izmjene modela. Korištenjem računalnog programa, poput Ansys Fluent-a, nema troškova koji nastaju tokom samog testiranja, ali postoje troškovi korištenja licence. Rezultati se dobivaju pomoću numeričkih simulacija koje koriste stvarne dimenzije te sve karakteristike koje bi realni proizvod trebao imati. Računalni program nam omogućava pregled svih vrijednosti koje bi nas mogle zanimati, kao npr. brzina, tlak, kinetička energija itd., ali nam također omogućava brzu i jednostavnu izmjenu geometrije i ulaznih uvjeta te usporedbu različitih verzija. To je prikazano na slici 4.4. gdje se može vidjeti tlak na rotorskim lopaticama pri različitim protocima.



Slika 4.4. Analiza kavitacije pri različitim uvjetima [27]

## 5. NUMERIČKA ANALIZA STRUJANJA KROZ DIFUZOR

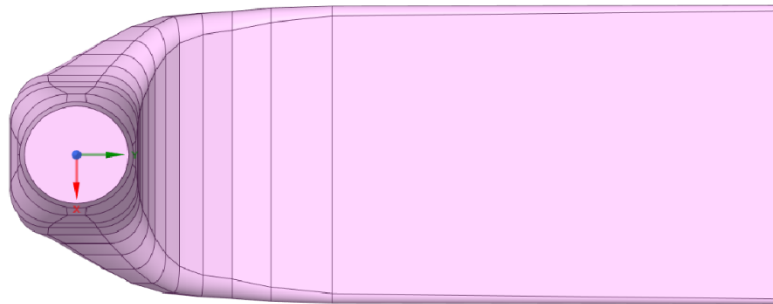
### 5.1. Geometrija

Prvi korak koji je potrebno napraviti za uspješno rješavanje bilo kakvog problema u Ansys Fluent-u je stvaranje geometrije predmeta za kojeg stvaramo simulaciju. Geometrija predmeta može biti napravljena u mnogim programima, a jedan od poznatijih i popularnijih programa koji se može koristiti je CATIA od tvrtke Dassault Systemes-a. Nakon stvaranja geometrije u npr. programu CATIA, potrebno je pretvoriti vrstu datoteke (npr. geometrija.CATpart) u datoteku koju Ansys Fluent može čitati (npr. geometrija.STEP).

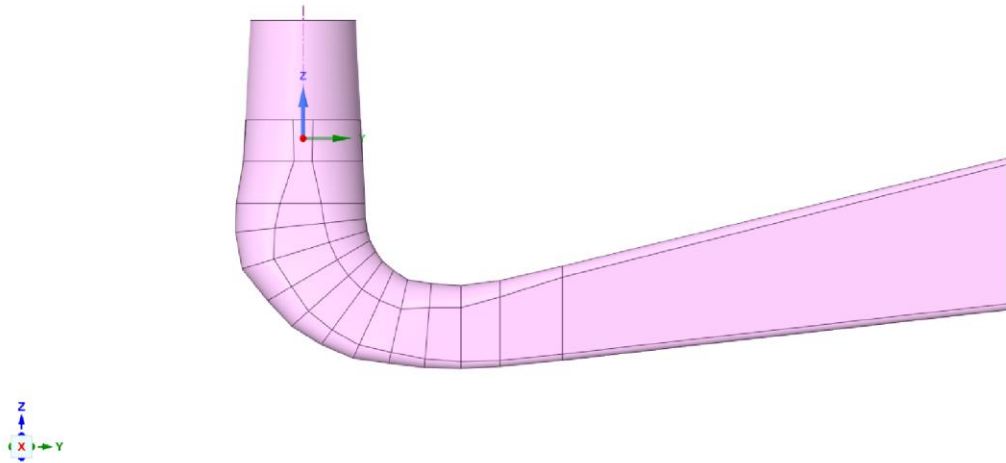
U svrhu ovog završnog rada, geometriju nije potrebno raditi jer je ona već zadana kao dio zadatka ovog specifičnog završnog rada. Na sljedećim slikama (slike 5.1., 5.2., 5.3.) se može vidjeti geometrija zadana za ovaj završni rad iz različitih kuteva.

Click to set a secondary selection to be used within other tools

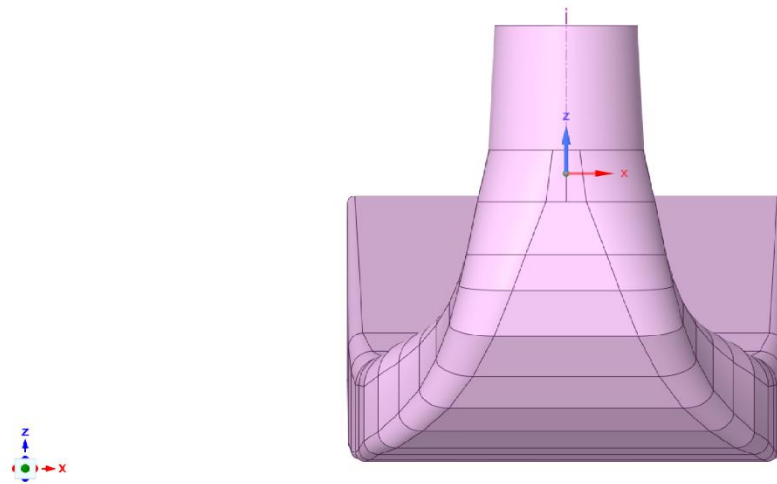
Ansys  
2021 R2  
STUDENT



Slika 5.1. Tlocrt geometrije



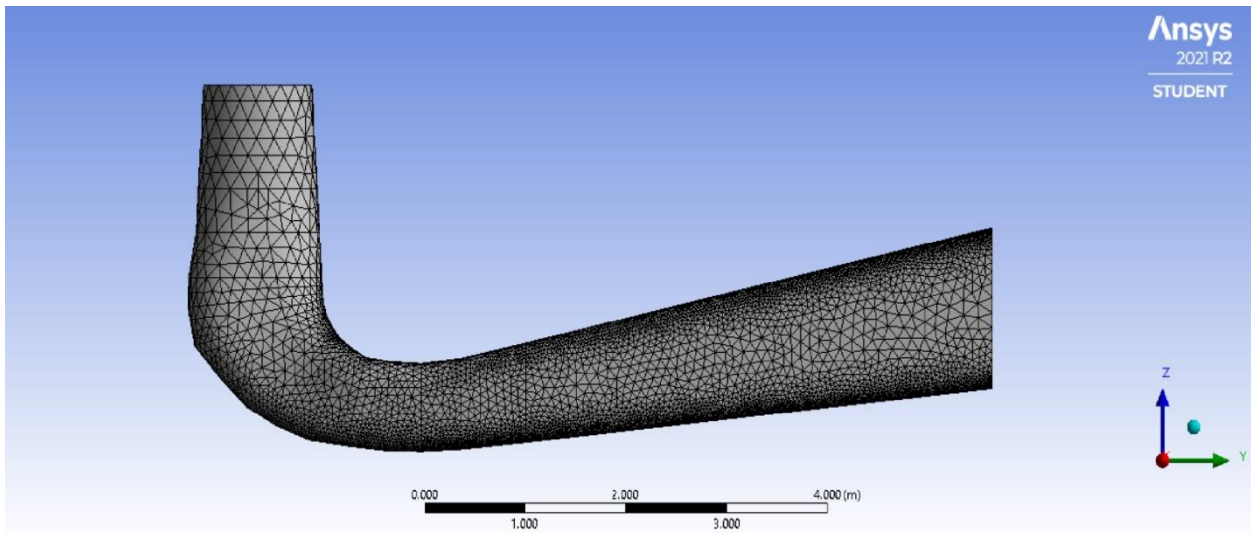
*Slika 5.2. Nacrt geometrije*



*Slika 5.3. Bokocrt geometrije*

## 5.2. Izrada numeričke mreže

Nakon izrade ili uvoženja geometrije u program, potrebno je stvaranje same numeričke mreže, a za to koristimo funkciju „mesh“. Ona može automatski stvoriti numeričku mrežu, ali za preciznije rezultate je potrebno napraviti određene promjene. Te promjene obuhvaćaju postavljanje preference CFD i preference Fluent. Na slici 5.4. prikazana je numerička mreža s CFD preferencom.

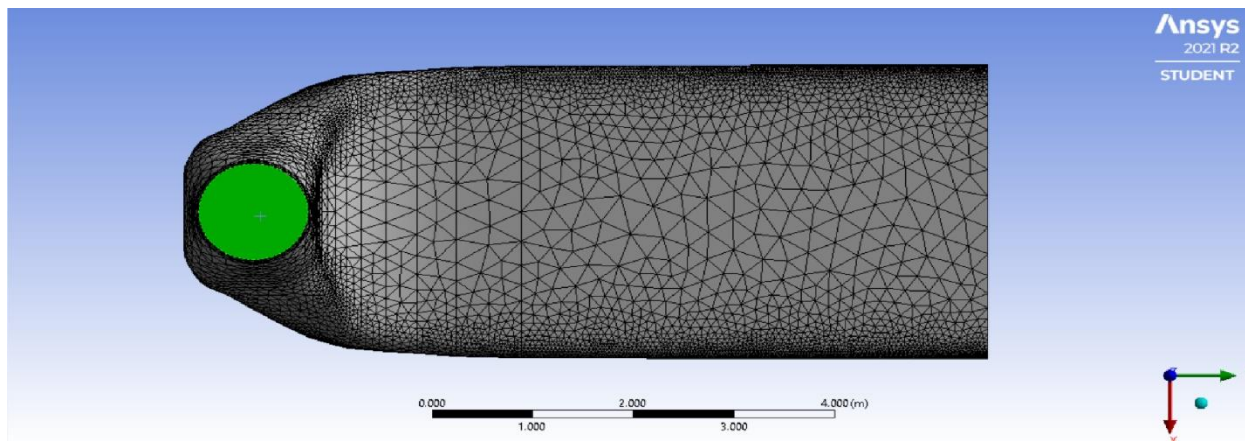


*Slika 5.4. Nacrt geometrije s numeričkom mrežom*

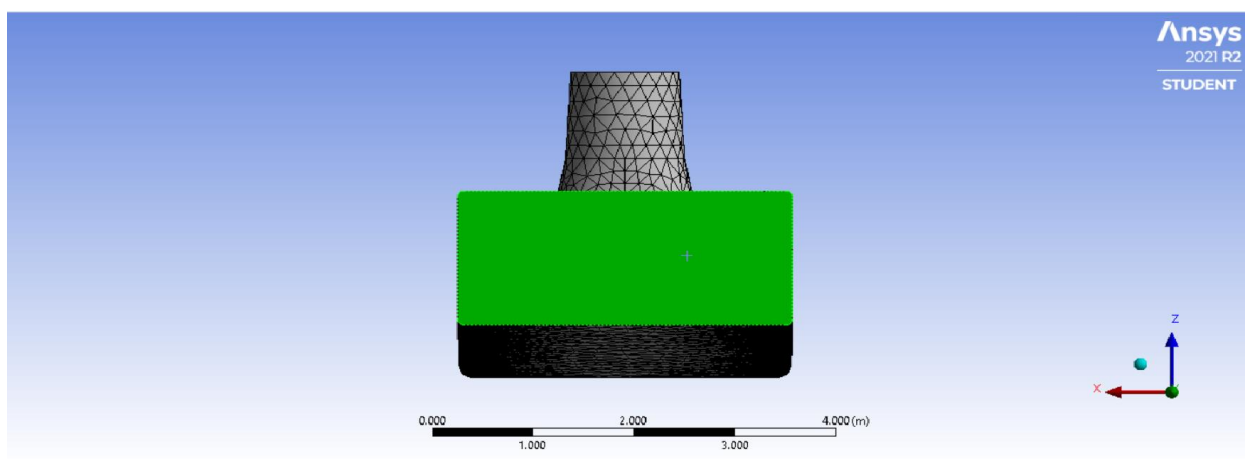
CFD je kratica s punim značenjem „Computational Fluid Dynamics“ i ona označava način rješavanja problema vezanih s protokom fluida. CFD se koristi numeričkim analizama i strukturama podataka za njihovo rješavanje. Računala stvaraju simulaciju pomoću iterativnog rješavanja Navier-Stokesovih jednadžbi u području svakog polja mreže te prikazuju protok fluida i njegove interakcije s površinama definiranih pomoću graničnih uvjeta.



Za lakši daljnji rad, možemo označiti različite dijelove difuzora kao što su „Inlet“, odnosno ulazni presjek difuzora, i „Outlet“, odnosno izlazni presjek difuzora. Ti su dijelovi prikazani na slikama 5.5. i 5.6.

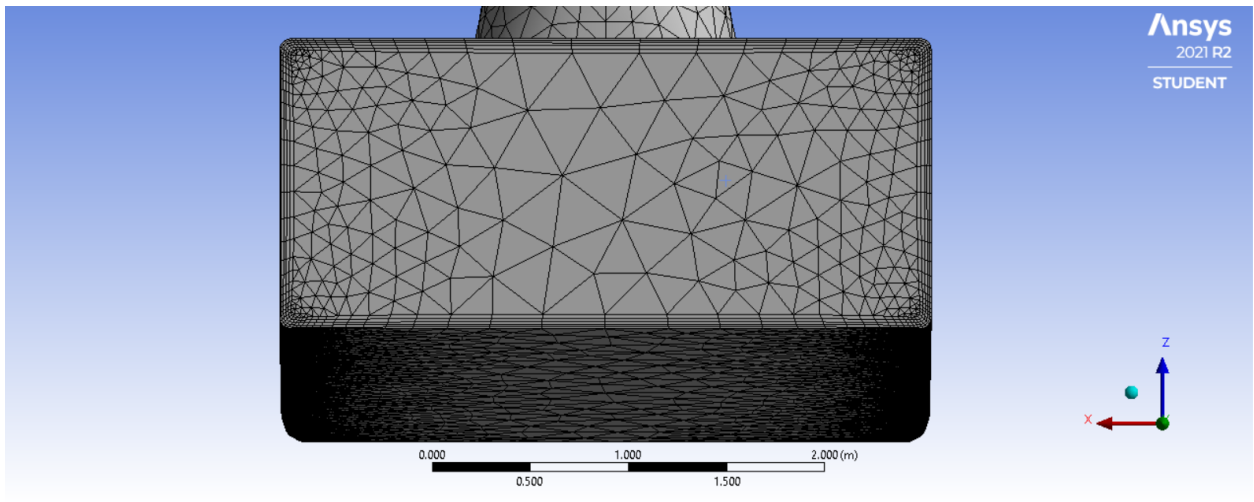


Slika 5.5. „Inlet“

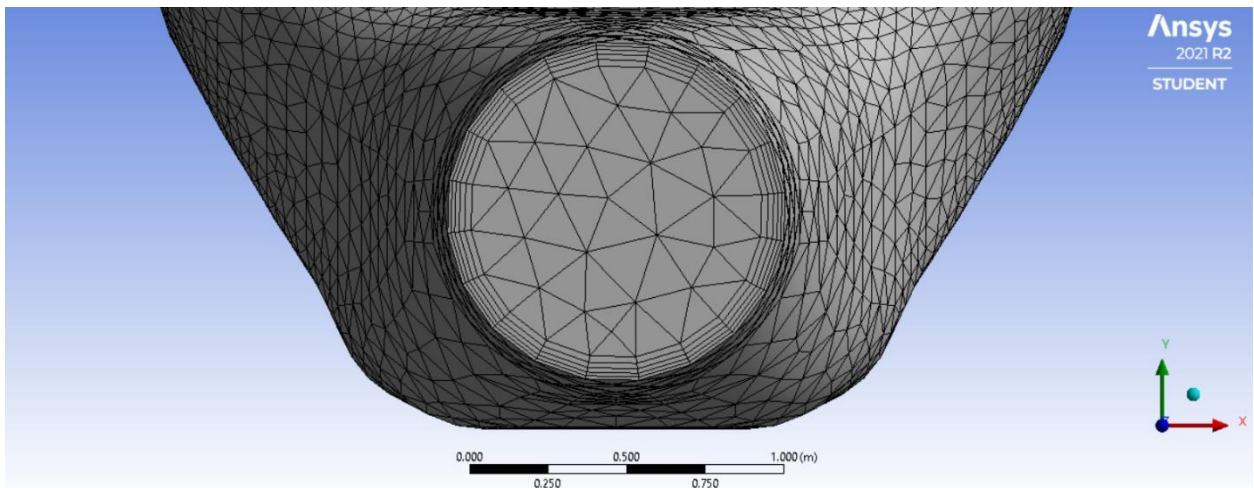


Slika 5.6. „Outlet“

Nakon stavljanja preference za CFD, može se koristiti funkcija „Inflation“. Inflacija u ANSYS-u postiže slaganje ćelija ili elemenata u smjeru normale na graničnim dijelovima numeričke mreže čime se bolje opisuje ponašanje fluida u zadanoj geometriji. S tom funkcijom ćemo koristiti preferencu „First Layer Thickness“ i staviti debljinu tih slojeva 0,01 m za bolju simulaciju fluida. Na slikama 5.7. i 5.8. možemo vidjeti izrađenu numeričku mreže s inflacijom.



*Slika 5.7. „Outlet“ s inflacijom*



*Slika 5.8. „Inlet“ s inflacijom*

### 5.3. Izrada simulacije

Nakon kreiranja numeričke mreže, možemo postaviti sve potrebne opcije i uvjete za dobivanje simulacije fluida koja se stvara iterativnim rješavanjem Navier-Stokseovih jednadžbi koje opisuju brzinu strujanja, tlak, temperaturu te ostale veličine. Prva postavka koju odabiremo je k-epsilon turbulentni model strujanja. U ovom slučaju se koristi tekuća voda i nju se može pronaći već definiranu u samom programu uz razne ostale fluide i njihova pripadajuća svojstva. Potom možemo postaviti ulazne i izlazne uvjete (ovdje su to uvjeti na „inlet“-u i „outlet“-u). Ulazni je uvjet definiran zadatkom završnog rada kao  $9 \text{ m}^3/\text{s}$  i za to koristimo rubni uvjet „mass flow inlet“.

Rubni uvjet na izlazu iz difuzora definiramo pomoću rubnog uvjeta „pressure outlet“ te njega dobivamo pomoću formule za hidrostatski tlak koja glasi:

$$p = \rho \cdot g \cdot h \quad (5.1.)$$

gdje je:

$p$  - hidrostatski tlak [Pa]

$\rho$  - gustoća fluida [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$g$  - ubrzanje sile teže [ $\text{m}/\text{s}^2$ ]

$h$  - dubina [m]

Gustoća vode pri standardnim uvjetima iznosi  $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$ , ubrzanje sile teže na Zemlji iznosi  $9.81 \text{ m}/\text{s}^2$ , a dubina središta izlaznog presjeka iznosi  $2.053 \text{ m}$  i to možemo uvrstiti u gornju formulu.

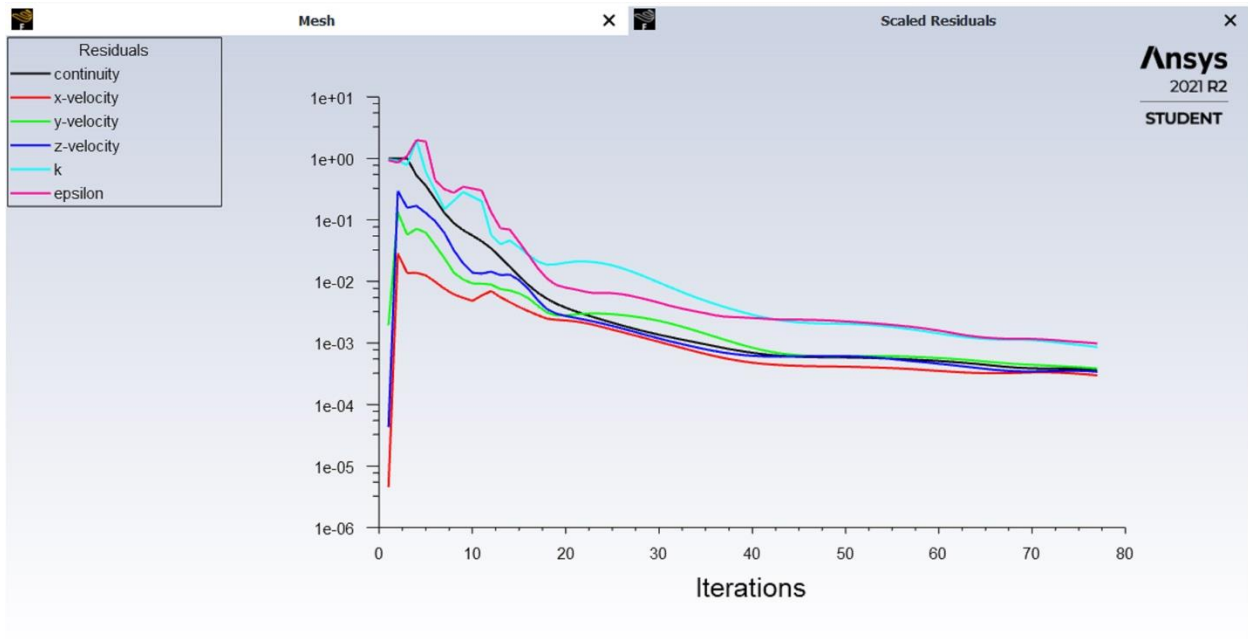
$$p = 1000 \cdot 9.81 \cdot 2.053$$

$$p = 20140 \text{ Pa}$$

Dobivamo pretlak od  $20140 \text{ Pa}$  te to uvrštavamo u program kao izlazni tlak. Za zadnji uvjet je potrebno staviti „No Slip“ uvjet za stijenkicu difuzora, jer je brzina fluida na stijenci jednaka nuli. Nakon postavljanja svih uvjeta i mijenjanja potrebnih opcija, moguće je pokrenuti program i on počinje rješavati jednadžbe.

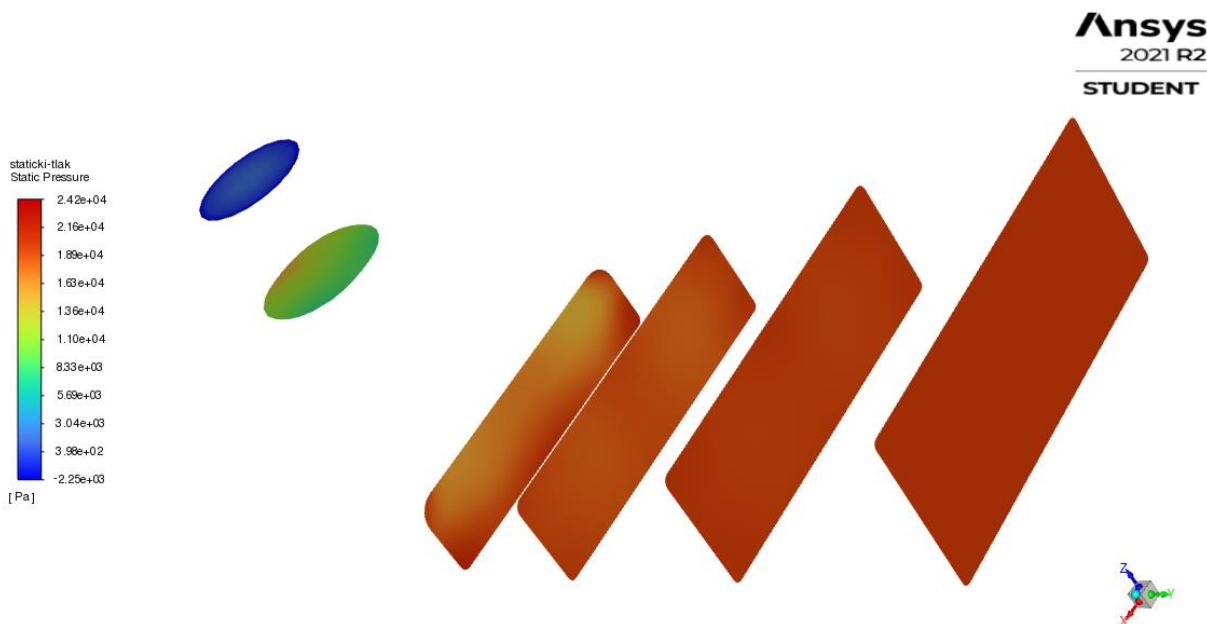
## 5.4.Prikaz rezultata

Naposljetku se može vidjeti graf konvergencije (slika 5.9.) i moguće je grafički prikazati sve željene rezultate, a ovdje će biti prikazani rezultati statičkog i dinamičkog tlaka, apsolutnog tlaka te naposljetku brzine.



Slika 5.9. Graf konvergencije

Na sljedeće dvije slike (slike 5.10. i 5.11.) su prikazani rezultati statičkog tlaka iz simulacije. Na slici 5.10. su prikazane konture statičkog tlaka u određenim presjecima, dok su na slikama 5.11. prikazane konture statičkog tlaka u YZ ravnini. Možemo primjetiti da se statički tlak fluida njegovim strujanjem kroz difuzor povećava.

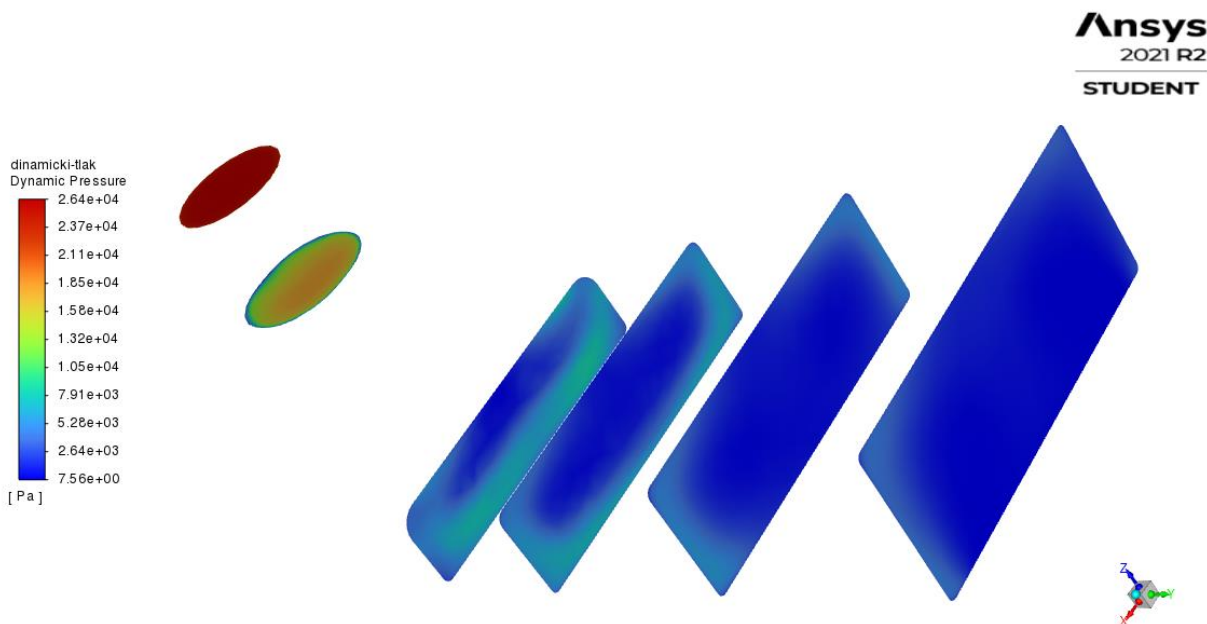


Slika 5.10. Konture statičkog tlaka po presjecima

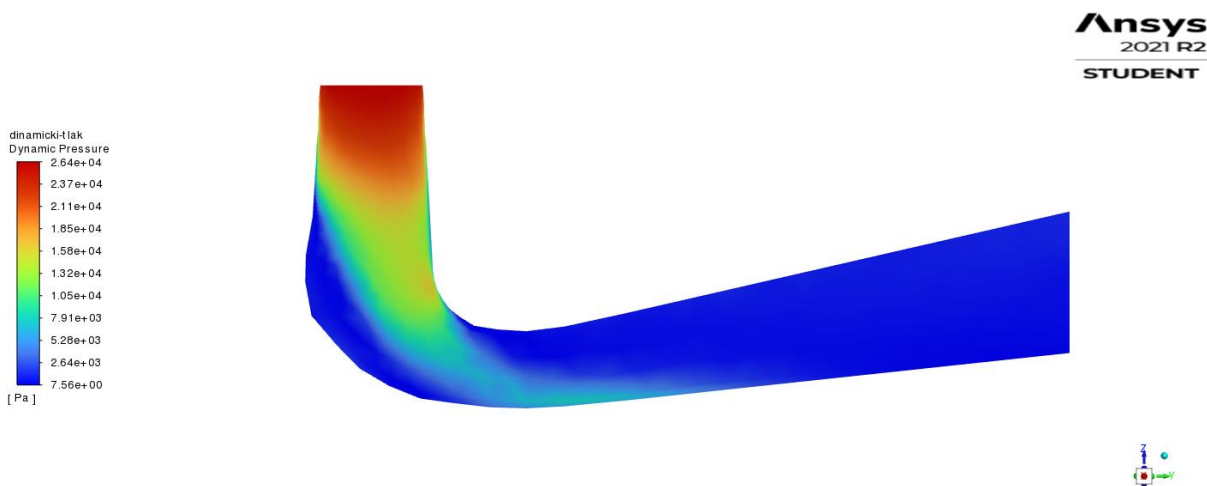


Slika 5.11. Konture statičkog tlaka u YZ ravnini

Na sljedeće dvije slike (slike 5.12. i 5.13.) su prikazani rezultati dinamičkog tlaka iz simulacije. Na slici 5.12. su prikazane konture dinamičkog tlaka u određenim presjecima, dok su na slikama 5.13. prikazane konture dinamičkog tlaka u YZ ravnini. Možemo primjetiti da se dinamički tlak fluida njegovim strujanjem kroz difuzor smanjuje.



Slika 5.12. Konture dinamičkog tlaka po presjecima

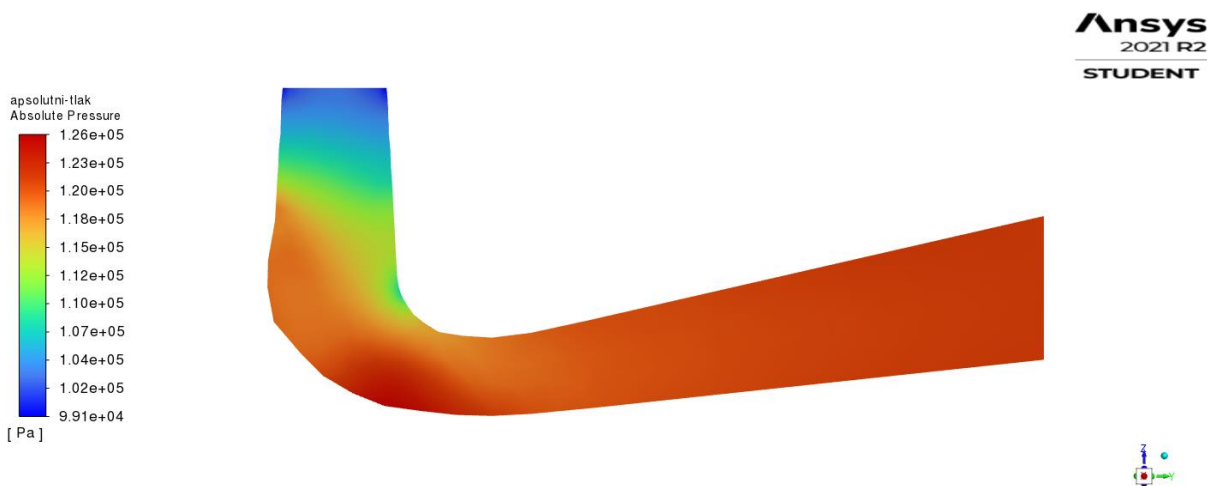


Slika 5.13. Konture dinamičkog tlaka u YZ ravnini

Na sljedeće dvije slike (slike 5.14. i 5.15.) su prikazani rezultati apsolutnog tlaka iz simulacije. Na slici 5.14. su prikazane konture apsolutnog tlaka u određenim presjecima, dok su na slikama 5.15. prikazane konture apsolutnog tlaka u YZ ravnini. Možemo primjetiti da se apsolutni tlak fluida njegovim strujanjem kroz difuzor povećava.

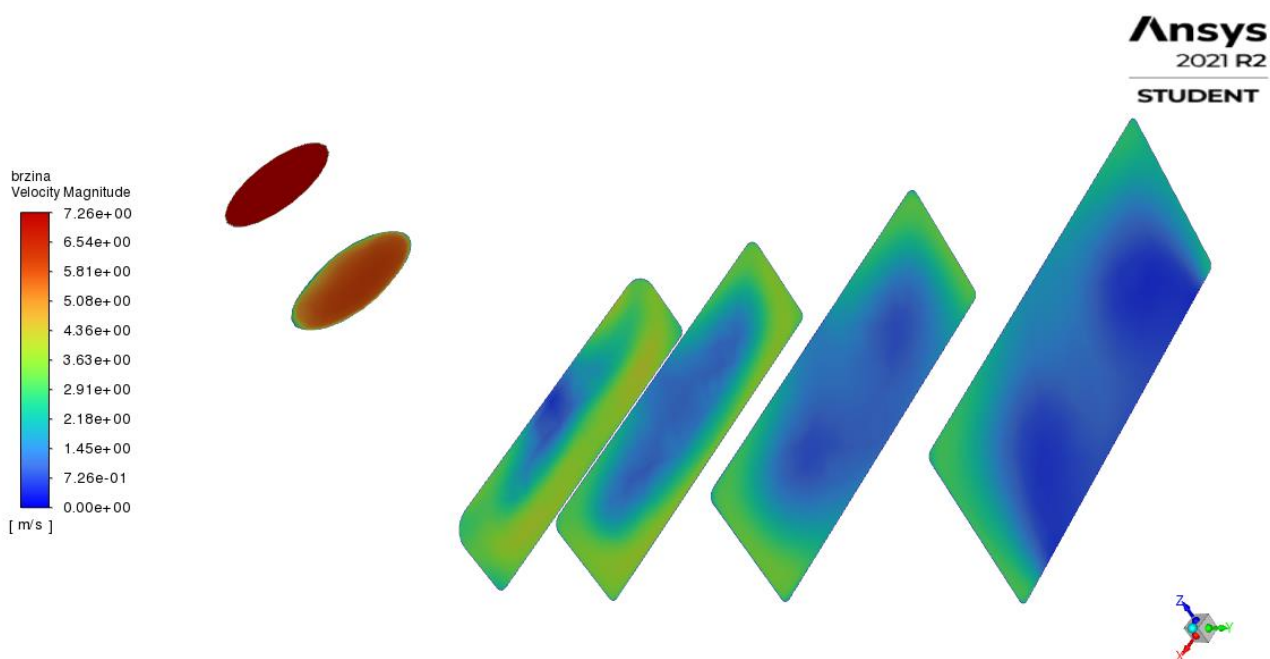


Slika 5.14. Konture apsolutnog tlaka po presjecima



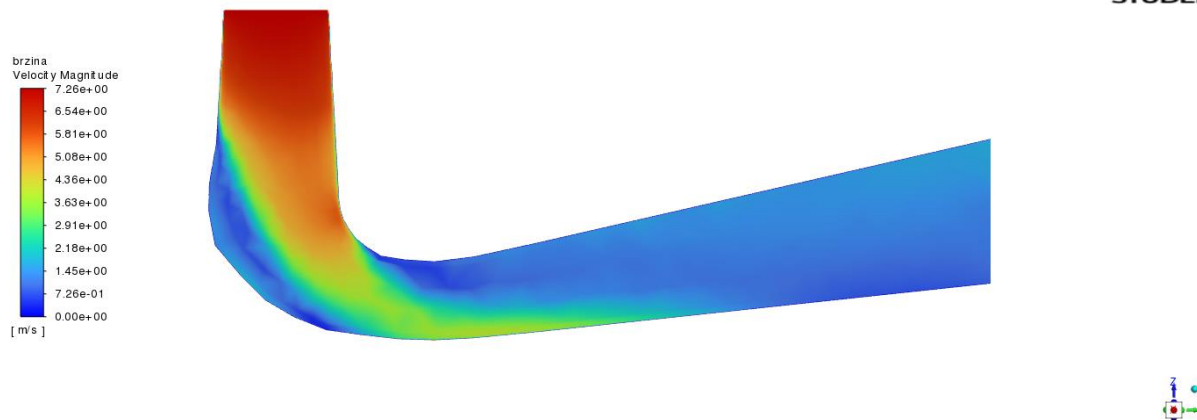
Slika 5.15. Konture apsolutnog tlaka u YZ ravnini

Na zadnjim slikama (slike 5.16., 5.17., 5.18., 5.19. i 5.20.) su prikazani rezultati brzine fluida simulacije. Na slici 5.16. su prikazane konture brzine fluida u određenim presjecima, na slici 5.17. su prikazane konture u YZ ravnini dok su na slikama 5.18. i 5.19. prikazane strujnice brzine fluida iz tlocrta i nacrta. Možemo primjetiti da se brzina fluida njegovim strujanjem kroz difuzor smanjuje. Pomoću strujnica koje opisuju protok vode možemo vidjeti da se stvaraju recirkulacijske zone unutar samog difuzora te se također može primjetiti i vrtloženje vode prilikom prolaza kroz difuzor. Na slici 5.20. moguće je vidjeti vrtloženje vode na izlaznom presjeku difuzora.

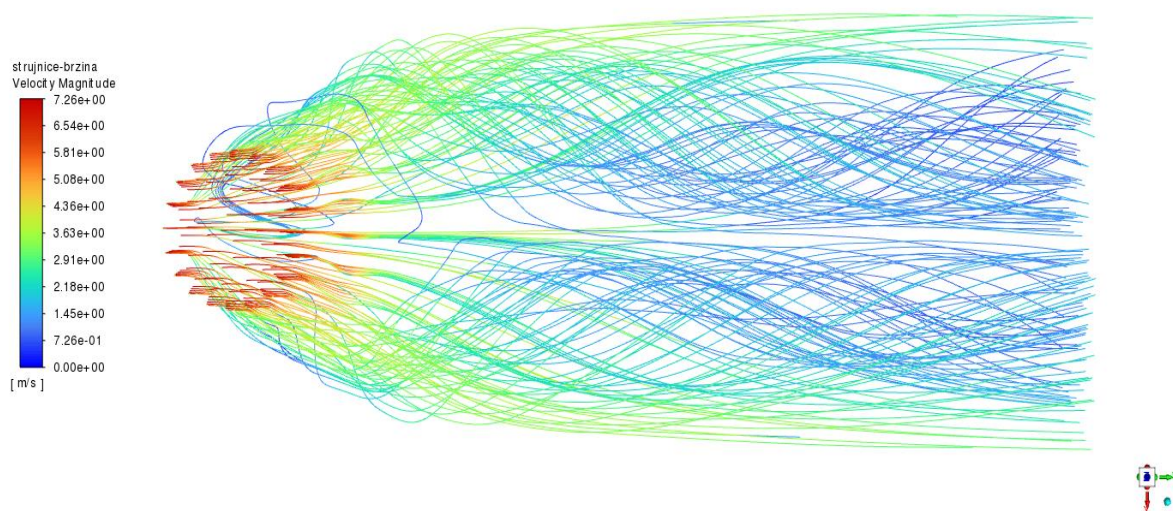


Slika 5.16. Konture brzina po presjecima

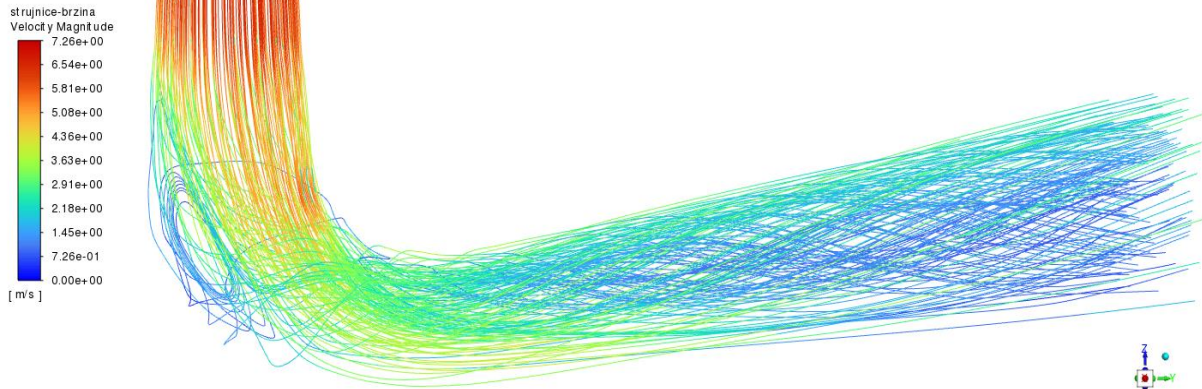




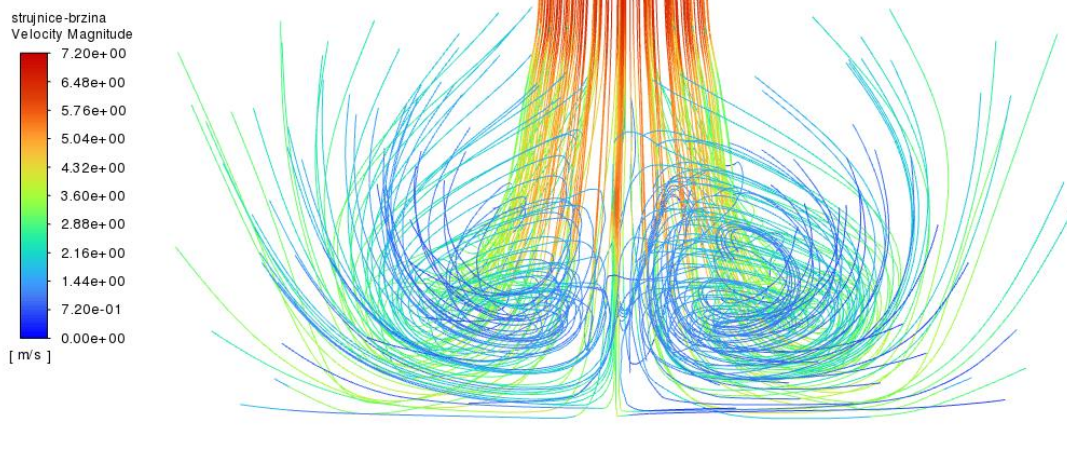
Slika 5.17. Konture brzina u YZ ravnini



Slika 5.18. Tlocrt geometrije sa strujnicama brzina



Slika 5.19. Nacrt geometrije sa strujnicama brzina



Slika 5.20. Bokocrt geometrije sa strujnicama brzina

## 6. ZAKLJUČAK

U sklopu ovog završnog rada napravljena je analiza strujanja fluida kroz difuzor s koljenom Francisove vodne turbine. Prvo dio završnog rada se fokusira na vodne turbine i napravljen je teoretski pregled vodnih turbina. Opisane su vrste vodnih turbina i navede su njihove razlike. Drugi se dio završnog rada bavi difuzorima i napravljen je teoretski pregled difuzora. Navedene su vrste difuzora i njihove razlike, objašnjen je princip rada difuzora te je odrađena analiza gubitaka u difuzoru. Nadalje je ukratko opisan sam program koji je korišten za stvaranje simulacije koja se kasnije analizira, odnosno opisan je program Ansys Fluent. Za zadanu geometriju difuzora izrađena je numerička mreža potrebna za izradu simulacije strujanja fluida. Napravljena je simulacija stacionarnog strujanja vode, korištenjem turbulentnog modela. Za provedenu analizu analizirani su statički, dinamički i apsolutni tlakovi kao i brzine kroz difuzor. Ti nam podaci omogućavaju detaljniji uvid u efikasnost rada same vodne turbine bez izrade fizičkih modela i prototipa. Ako rezultati nisu zadovoljavajući, moguće je relativno brzo i jednostavno prilagođavanje geometrije i stvaranje preinaka te također možemo ispitati rad turbine za različite režime rada, odnosno za različite protoke vode.

## 7. LITERATURA

- [1] S interneta, [https://hr.wikipedia.org/wiki/Hidrolo%C5%A1ki\\_ciklus](https://hr.wikipedia.org/wiki/Hidrolo%C5%A1ki_ciklus), 18. svibanj 2022.
- [2] Čarija, Z.: „Vodne turbine“, radni materijal predavanja kolegija Hidraulički strojevi, Rijeka, 2019.
- [3] S interneta, [https://hr.wikipedia.org/wiki/Turbina#Na%C4%8Din\\_rada](https://hr.wikipedia.org/wiki/Turbina#Na%C4%8Din_rada), 18. svibanj 2022.
- [4] S interneta, [https://www.researchgate.net/figure/Geometrical-dimensions-of-a-Pelton-bucket\\_fig11\\_304657563](https://www.researchgate.net/figure/Geometrical-dimensions-of-a-Pelton-bucket_fig11_304657563), 19. svibanj 2022.
- [5] S interneta, [https://www.researchgate.net/figure/Layout-of-Pelton-Turbine\\_fig1\\_306034814](https://www.researchgate.net/figure/Layout-of-Pelton-Turbine_fig1_306034814), 19. svibanj 2022.
- [6] S interneta, [https://hr.wikipedia.org/wiki/Datoteka:Walchenseewerk\\_Pelton\\_120.jpg](https://hr.wikipedia.org/wiki/Datoteka:Walchenseewerk_Pelton_120.jpg), 19. svibanj 2022.
- [7] S interneta, [https://energyeducation.ca/encyclopedia/Crossflow\\_turbine](https://energyeducation.ca/encyclopedia/Crossflow_turbine), 19. svibanj 2022.
- [8] S interneta, <http://www.ossbergerhydro.com/cross-flow-turbines.html>, 19. svibanj 2022.
- [9] S interneta, [https://energyeducation.ca/encyclopedia/Turgo\\_turbine](https://energyeducation.ca/encyclopedia/Turgo_turbine), 19. svibanj 2022.
- [10] S interneta, <https://www.turbinesinfo.com/turgo-turbines/>, 19. svibanj 2022.
- [11] S interneta, [https://hr.wikipedia.org/wiki/Teslina\\_turbina](https://hr.wikipedia.org/wiki/Teslina_turbina), 19. svibanj 2022.
- [12] S interneta, <https://www.semanticscholar.org/paper/Tesla-Turbine-for-Pico-Hydro-Applications-Ho-Yan/264eb0a8d212a4ebc2cbe5c951b69af2d657e2e7>, 19. svibanj 2022.
- [13] S interneta, [https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-a-Tesla-turbine\\_fig1\\_317013247](https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-a-Tesla-turbine_fig1_317013247), 19. svibanj 2022.
- [14] S interneta, [https://en.m.wikipedia.org/wiki/File:Fairmount\\_Water\\_Works\\_Jonval\\_Turbine\\_Cutaway.jpg](https://en.m.wikipedia.org/wiki/File:Fairmount_Water_Works_Jonval_Turbine_Cutaway.jpg), 19. svibanj 2022.
- [15] S interneta, [https://www.researchgate.net/figure/Turbine-application-chart\\_fig1\\_257177069](https://www.researchgate.net/figure/Turbine-application-chart_fig1_257177069), 23. svibanj 2022.
- [16] S interneta, [https://www.researchgate.net/figure/The-runner-of-a-typical-Kaplan-turbine-The-4-blades-are-adjustable-to-improve-efficiency\\_fig13\\_323300979](https://www.researchgate.net/figure/The-runner-of-a-typical-Kaplan-turbine-The-4-blades-are-adjustable-to-improve-efficiency_fig13_323300979), 23. svibanj 2022.

- [17] S interneta, <https://www.hkdivedi.com/2019/07/francis-turbine-diagram-and-working.html>, 23. svibanj 2022.
- [18] S interneta, [https://en.wikipedia.org/wiki/Screw\\_turbine](https://en.wikipedia.org/wiki/Screw_turbine), 23. svibanj 2022.
- [19] S interneta, [https://www.wikiwand.com/en/Monmouth\\_New\\_Hydro\\_Scheme](https://www.wikiwand.com/en/Monmouth_New_Hydro_Scheme), 23. svibanj 2022.
- [20] Krivchenko, G.: „Hydraulic machine, turbines and pumps“, MIR Publishers, Moskva, 1986.
- [21] Abbas, A.; Kumar, A.: „Development od draft tube in hydro-turbine: A review“, Taylor & Francis, Indija, 2015.
- [22] S interneta, [https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/turbina\\_vodna.pdf](https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/turbina_vodna.pdf), 9. lipanj 2022.
- [23] S interneta, <https://www.ansys.com/products/acoustics-simulation/ansys-sound>, 25. svibanj 2022.
- [24] S interneta, <https://www.ansys.com/products/photonics/heat>, 25. svibanj 2022.
- [25] S interneta, <http://web.chpc.ac.za/chpc-acquires-ansys-fluent-licence/>, 25. svibanj 2022.
- [26] S interneta, <https://youtu.be/OBae-GV9KEA?t=44>, 25. svibanj 2022.
- [27] S interneta, <https://www.semanticscholar.org/paper/CFD-Simulation-of-Centrifugal-Pump-ImpellerUsing-Muttalli-Agrawal/721a42abd9e976577f9c0e34068ed275e52c8f53/figure/4>, 25. svibanj 2022.

## 8. POPIS OZNAKA

$p_2$  – tlak na ulaznom presjeku difuzora [Pa]

$p_{\text{atm}}$  – atmosferski tlak [Pa]

$H_s$  – visina postavljanja turbine iznad donje razine vode [m]

$h_{\text{gub,dif}}$  – gubitak pada vode [m]

$v_2$  – brzina na ulaznom presjeku difuzora [m/s]

$v_3$  – brzina na izlaznom presjeku difuzora [m/s]

$\alpha_2$  – faktor korekcije brzine na ulaznom presjeku difuzora

$\alpha_3$  – faktor korekcije brzine na izlaznom presjeku difuzora

$\rho$  – gustoća vode [ $\text{kg/m}^3$ ]

$g$  – ubrzanje sile teže [ $\text{m/s}^2$ ]

$C_p$  - Stvarni oporavak tlaka

$p_3$  – tlak na izlaznom presjeku difuzora [Pa]

$C_{pi}$  - Idealni oporavak tlaka

$A_2$  – površina ulaznog poprečnog presjeka [ $\text{m}^2$ ]

$A_3$  – površina izlaznog poprečnog presjeka [ $\text{m}^2$ ]

$\eta_{\text{cp}}$  – efikasnost difuzora

$\zeta$  – faktor gubitka

$H_{\text{gub,dif}}$  – gubici u difuzoru [m]

$k_{\text{dif}}$  – koeficijent lokalnog otpora difuzora

$e_2$  – specifična energija na ulaznom presjeku [J/kg]

$e_3$  – specifična energija na izlaznom presjeku [J/kg]

$p_{3\text{sr}}$  – tlak na sredini presjeka 3-3 [Pa]

$z_3$  – dubina sredine presjeka 3-3 ispod donje razine vode [m]

$\Delta e$  – razlika specifičnih energija [J/kg]

$Q$  – volumni protok vode [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

$d$  - promjer kruga [m]

$p$  - hidrostatski tlak [Pa]

$\rho$  - gustoća fluida [ $\text{kg/m}^3$ ]

$h$  - dubina [m]

## 9. POPIS SLIKA

Slika 2.1. Hidrološki ciklus .....	2
Slika 2.2. Razlika akcijskih i reakcijskih turbina .....	3
Slika 2.3. Geometrija lopatice Peltonove turbine.....	5
Slika 2.4. Pelton-ova turbina s 6 sapnica .....	6
Slika 2.5. Višerotorska peltonova turbina u HE Walchensee .....	6
Slika 2.6. Presjek turbine s križnim presjekom .....	7
Slika 2.7. Turgo turbina.....	8
Slika 2.8. Konstrukcija Tesline turbine .....	9
Slika 2.9. Protok fluida kroz Teslinu turbinu .....	9
Slika 2.10. Jonvalova turbina u komunalnom vodovodu Fairmount .....	10
Slika 2.11. Dijagram područja korištenja vodnih turbina .....	11
Slika 2.12. Kaplan-ova turbina s pomičnim lopaticama .....	12
Slika 2.13. Presjek i dijelovi Francis-ove turbine .....	13
Slika 2.14. HE s dva Arhimedova puža .....	14
Slika 3.1. Bruto pad.....	16
Slika 3.2. Shematski prikaz difuzora.....	16
Slika 3.3. Kavitacijski vrtlozi .....	20
Slika 3.4. Skica difuzora s označenim presjecima .....	21
Slika 3.5. Ravni konični difuzor.....	24
Slika 3.6. Savinuti konični difuzor .....	25
Slika 3.7. Obični prošireni difuzor .....	26
Slika 3.8. Moody-ev difuzor .....	26
Slika 3.9. Difuzor s koljenom.....	27
Slika 4.1. Protok fluida kroz spiralu turbine u programu Ansys Fluent.....	28
Slika 4.2. Razlike simulacije Ansys Fluent-a i OpenFOAM-a .....	29
Slika 4.3. Razlike simulacije Ansys Fluent-a i OpenFOAM-a .....	29
Slika 4.4. Analiza kavitacije pri različitim uvjetima .....	30
Slika 5.1. Tlocrt geometrije.....	31
Slika 5.2. Nacrt geometrije.....	32
Slika 5.3. Bokocrt geometrije.....	32
Slika 5.4. Nacrt geometrije s numeričkom mrežom .....	33
Slika 5.5. „Inlet“ .....	34
Slika 5.6. „Outlet“ .....	34
Slika 5.7. „Outlet“ s inflacijom .....	35
Slika 5.8. „Inlet“ s inflacijom.....	35

Slika 5.9. Graf konvergencije.....	37
Slika 5.10. Konture statičkog tlaka po presjecima .....	38
Slika 5.11. Konture statičkog tlaka u YZ ravnini.....	38
Slika 5.12. Konture dinamičkog tlaka po presjecima.....	39
Slika 5.13. Konture dinamičkog tlaka u YZ ravnini .....	39
Slika 5.14. Konture apsolutnog tlaka po presjecima .....	40
Slika 5.15. Konture apsolutnog tlaka u YZ ravnini.....	40
Slika 5.16. Konture brzina po presjecima .....	41
Slika 5.17. Konture brzina u YZ ravnini .....	42
Slika 5.18. Tlocrt geometrije sa strujnicama brzina.....	42
Slika 5.19. Nacrt geometrije sa strujnicama brzina.....	43
Slika 5.20. Prikaz vrtloženja u difuzoru .....	43



## 10. SAŽETAK

U ovom se završnom radu napravljen je pregled teorije vodnih turbina, navedena je njihova podjela te su navedene njihove razlike i opisane su različite vrste vodnih turbina. Detaljnije je objašnjen princip rada difuzora, opisane su vrste difuzora i napravljena je analiza smanjenja gubitaka korištenjem difuzora. U završnom dijelu završnog rada opisan je program Ansys Fluent. Nakon toga je izrađena numerička mreža za zadanu geometriju te je zatim napravljena 3D analiza strujanja kroz difuzor. Rezultati simulacije koji se odnose na tlakove i brzine u sustavu su naposljetku grafički prikazani i analizirani koristeći se teorijom iz prethodnih dijelova završnog rada.

Ključne riječi: vodna turbina, difuzor, Ansys Fluent, simulacija fluida, analiza strujanja fluida

## **11. ABSTRACT**

In this thesis an examination was made concerning the theory behind water turbines, it discusses their division, it discusses their differences and different types of water turbines are described. It describes the principles of draft tube operation in greater detail, it describes different types of draft tubes and an analysis of the reduction of output losses by using a draft tube is written. In the final part of the thesis, the program Ansys Fluent is described. After that a mesh is made for the given geometry and then a 3D fluid flow analysis through the draft tube is made. The simulation results which pertain to pressures and velocities in the system are graphically presented and analyzed using theory from the previous parts of this thesis.

Key words: water turbine, draft tube, Ansys Fluent, fluid simulation, fluid flow analysis