

Analiza strujanja kroz difuzor vodne turbine tip 2

Kranjec, Marin

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:881399>

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 2

Rijeka, ožujak 2023.

Marin Kranjec

0069086972

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

ANALIZA STRUJANJA KROZ DIFUZOR VODNE TURBINE

TIP 2

Mentor: Prof. dr. sc. Zoran Čarija

Rijeka, ožujak 2023.

Marin Kranjec

0069086972

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 2“ pod vodstvom prof. dr. sc. Zorana Čarije.

Rijeka, ožujak 2023.

Marin Kranjec

0069086972

ZAHVALA

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Zoranu Čariji na prilici i na pomoći za izradu završnog rada.

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

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

Sadržaj

1	UVOD	1
2	VODNE TURBINE.....	2
2.1	Reakcijske turbine	4
2.1.1	Francis-ova turbina.....	5
2.1.2	Kaplan-ova turbina.....	6
2.1.3	Arhimedov puž.....	7
2.2	Akcijske turbine.....	8
2.2.1	Pelton-ova turbina	9
2.2.2	Turgo turbina.....	11
2.2.3	Turbina s križnim protokom.....	11
2.2.4	Teslina turbina.....	12
2.2.5	Jonval-ova turbina	13
3	DIFUZOR.....	14
3.1	Uloga difuzora	14
3.2	Vrste difuzora	14
3.2.1	Konusni difuzor.....	15
3.2.2	Jednostavni koljenasti difuzor	16
3.2.3	Moodyjev difuzor	16
3.2.4	Koljenasti difuzor s promjenjivim presjekom	16
4	GUBICI U TURBINI.....	17
4.1	Hidraulički gubici	17
4.2	Volumetrički gubici	22
4.3	Mehanički gubici	22
5	NUMERIČKA ANALIZA STRUJANJA KROZ DIFUZOR TURBINE	24
5.1	Izrada geometrije	25
5.2	Izrada numeričke mreže.....	26
5.3	Izrada simulacije.....	29

6	REZULTATI.....	32
6.1	Graf konvergenције	33
6.2	Brzine strujanja fluida	34
6.3	Statički tlak	38
6.4	Dinamički tlak	39
6.5	Apsolutni tlak	40
7	ZAKLJUČAK	41
8	LITERATURA.....	42
9	POPIS OZNAKA	44
10	POPIS SLIKA	46
11	SAŽETAK.....	48
12	ABSTRACT	49

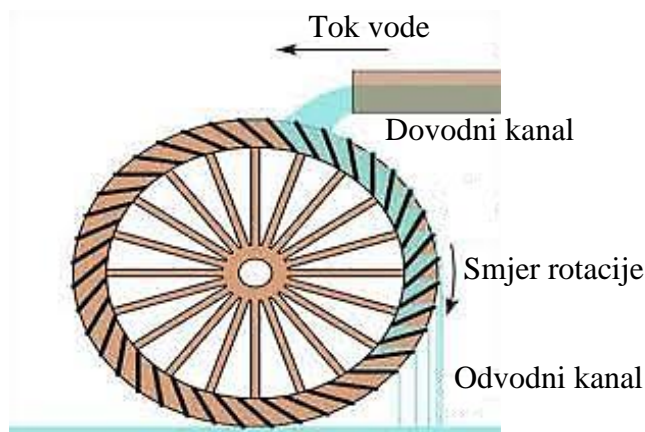
1 UVOD

Energija opisuje sposobnost nekog tijela ili sustava da obavi mehanički rad. Ona prema zakonu očuvanja energije se ne može ni stvoriti ni potrošiti, već može samo mijenjati oblik iz jednog oblika u drugi. Hidro energija, ili energija vode, je najvažniji obnovljivi izvor energije zbog njezine visoke energetske učinkovitosti u pretvorbi energije. Potencijalna energija vode pretvara se u kinetičku energiju strujanja vode unutar hidroelektrane, točnije u vodnoj turbini, koja tu kinetičku energiju pretvara u mehanički rad za pogon generatora. Koliko energije se stvara hidro energijom govori činjenica da se 55% više energije dobiva hidro energijom u usporedbi sa nuklearnom energijom. U 2020. god., čak 17% sveukupne električne energije je dobiveno u hidroelektranama [1]. Jedan od važnijih dijelova hidroelektrane, koji značajno utječe na ukupnu korisnost vodne turbine, je difuzor. Difuzor povećava ukupnu korisnost vodne turbine tako da smanjuje ukupne gubitke izlazne energije.

Zadatak ovog završnog rada je analizirati strujanja vode kroz difuzor vodne turbine, te je sukladno zadatku objašnjeno u drugom poglavlju što su vodne turbine, kakav je njihov princip rada te je navedena podjela turbina na akcijske i reakcijske. Turbine koje je potrebno izdvojiti su Francis-ova turbina, Kaplan-ova turbina i Pelton-ova turbina. Nadalje u trećem poglavlju objašnjava se što je difuzor i kako on radi te je opisana podjela difuzora. Nakon difuzora, u četvrtom poglavlju su opisani gubici u vodnoj turbini, a u petom poglavlju se opisuje analiza strujanja u programu „Ansys Fluent“, pomoću kojeg su dobiveni rezultati za usporedbu strujanja brzina i tlakova kod dva konstrukcijski različita difuzora. Potrebno je preuzeti geometriju difuzora te istu otvoriti u programu „Design Modeler“. Design Modeler je program u kojem je moguće izraditi i modificirati geometriju za izradu simulaciju. Nakon potrebnih modifikacija, geometriju otvaramo u programu „Mesh“, u kojem se vrši izrada numeričke mreže. Odabire se postavka CFD metode, zbog toga što CFD metoda rješava probleme vezane uz strujanje fluida. Završetkom izrade numeričke mreže, u programu „Fluent“ računalom rješavamo Navier-Stokesove jednadžbe za dobivanje simulacije strujanja vode kroz difuzor vodne turbine. Potrebno je definirati inicijalizaciju rješenja od ulaznog presjeka, kao i brzinu strujanja, uz još nekoliko dodatnih postavki, koje su spomenute u petom poglavlju. Krajnji rezultati prikazuju se grafom konvergencije rješenja, konturama statičkog, dinamičkog i apsolutnog tlaka te konturama i strujnicama brzine strujanja fluida.

2 VODNE TURBINE

Vodne turbine se prvi put pojavljuju za vrijeme industrijske revolucije. Riječ turbina osmislio je francuski inženjer Claude Bourdin početkom 19. stoljeća te dolazi od latinske riječi za „vrtloženje“. Prije vodnih turbina se tisućama godina za dobivanje snage koristilo vodeničko kolo za pogon mlinova. Vodeničko kolo je najstariji uređaj za pretvorbu hidroenergije u mehaničku energiju. Ono se sastoji od okruglog drvenog ili metalnog okvira, na čijem okviru se nalaze lopatice, koje služe za pogon. Prijenos snage je preko vodoravno ugrađene osovine. Pogonska sila vodeničkog kola nastaje zbog težine vode ili pretlaka zastoja vode, a ne kao rezultat promjene količine gibanja. Iz tog razloga se vodenička kola ne smatraju vodnim turbinama [2]. Glavna razlika između vodne turbine i vodeničkog kola je vrtložna komponenta gibanja vode koja daje energiju rotoru. Ta komponenta je omogućila prijelaz sa velikih dimenzija vrtložnog kola na dosta manje dimenzije vodne turbine iste snage.

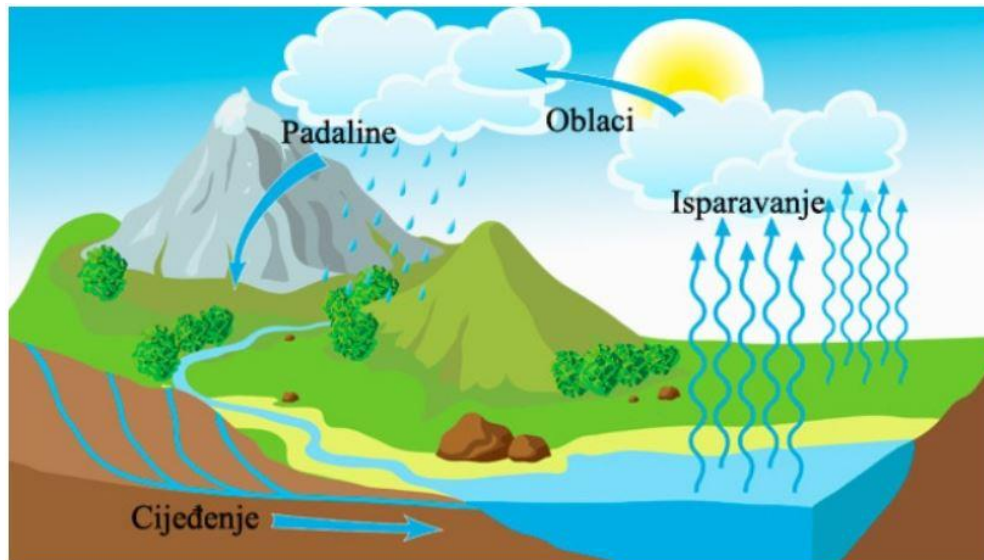


Slika 2.1. Vodeničko kolo [2]

Vodna energija danas predstavlja najrealniji način povećanja proizvodnje tzv. „zelene“ energije. Neke zemlje Europske unije, koje se smatraju izrazito „zelenim“ zemljama, električnu energiju dobivaju baš iz energije vode. Hrvatska spada u zemlje koje su bogate hidro energijom budući da preko 50% proizvedene električne energije se proizvede u hidroelektranama [3]. Najveći svjetski potrošači hidroenergije su Kina, Kanada i Brazil. U Kini, kao najvećem potrošaču hidroenergije u 2021. godini, potrošnja je iste godine iznosila 12,25 exajoula [4].

Vodnim turbinama oduzimamo energiju vodi na način da se vodne turbine uključe u sustav kruženja vode u prirodi. Pokretač cirkulacije je Sunce, jer ga možemo smatrati najsnažnijom poznatom crpkom. Sunčeva toplinska energija rezultira isparavanjem vode sa tekućica i stajaćica. Vodena para se podiže u slojeve atmosfere gdje se kondenziraju kapljice vode stvarajući oblake.

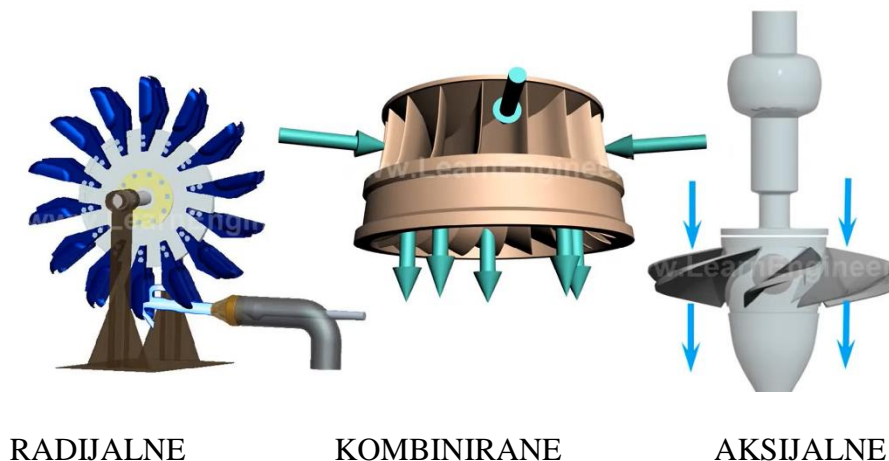
Voda se putem oborina vraća na zemlju, često u višim područjima gdje onda ta voda ima višu potencijalnu energiju [5]. Ukoliko vodnu turbinu „ubacimo“ u krug cirkulacije vode, moguće je iskoristiti jedan dio energije. Najbolje mjesto za ubacivanje vodne turbine je silazni put vode sa viših područja prema nižim, zbog iskorištavanja potencijalne energije.



Slika 2.2. Kruženje vode u prirodi [6]

Tok vode usmjerava se na lopatice rotora turbine, čime se stvara sila na lopaticama. Dobivena sila djeluje na putu zbog vrtnje rotora te se na taj način energija prenosi s toka vode na turbinu. Dakle, vodne turbine su energetske strojevi u kojima se potencijalna energija vode pretvara u kinetičku energiju, koja se pretvara u mehanički rad za pogon električnog generatora. Obično su jednostupanjske, a potencijalna energija vode koju mogu iskorištavati su od 1 m do 2000 m.

Podjela vodnih turbina je prema načinu pretvaranja energije i prema smjeru protoka. Prema smjeru protoka postoje radijalne, aksijalne, tangencijalne i radijalno – aksijalne turbine. Kod radijalnih turbina dovod vode je okomit na os, kod aksijalnih je dovod u smjeru osi, dok kod tangencijalnih turbina voda udara tangencijalno na lopatice. Dovod vode je kombiniran kod radijalno – aksijalne turbine. Prema načinu pretvaranje energije turbine se dijele na akcijske (impulsne) i reakcijske (pretlačne).



Slika 2.3. Turbine prema smjeru protoka [7]

2.1 Reakcijske turbine

Sve sile kojima fluid djeluje na lopatice rotora nazivamo reakcijskim silama. Reakcijska turbina je turbina u kojoj se zakretni moment postiže postupnim smanjenjem tlaka od ulaza prema izlazu turbine, kao i promjenom količine gibanja [2]. Ulazni presjeci su veći od izlaznih, stoga je ulazna brzina manje od izlazne, a kao posljedica je veći ulazni tlak od izlaznog.

Mlaz vode dolazi na lopatice rotora i mijenja tlak kako prolazi kroz turbinu i predaje energiju. Da bi se održao tlak vode (ili vlak), moraju biti u kućištu ili u potpunosti uronjene u vodu, što je i najčešći slučaj. Pad tlaka se pojavljuje na stacionarnim i pokretnim lopaticama. Reakcijske turbine se češće koriste od akcijskih. Koriste se pri niskom ili srednjem hidrostatskom tlaku te pri većim protocima vode.

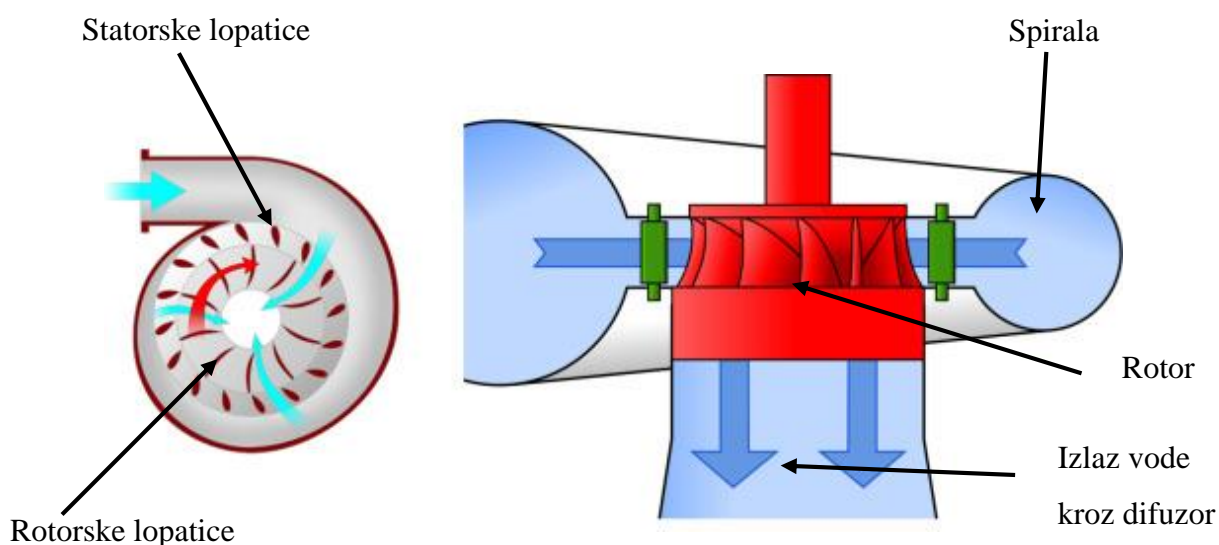
Razlikujemo sljedeće reakcijske turbine:

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

2.1.1 Francis-ova turbina

Francis-ova turbina je vrsta vodne turbine koju je konstruirao britansko-američki inženjer James Bicheno Francis 1849. godine, a primarno služi za proizvodnju električne energije uz pomoć generatora. Ova turbina ima veliki stupanj iskoristivosti kapaciteta s preko 90%, te je najzastupljeniji model turbine u hidroelektranama prvenstveno jer mogu raditi u širokom području, s padom od 20 metara pa sve do 700 metara te izlaznom snagom u rasponu do 750 MW.

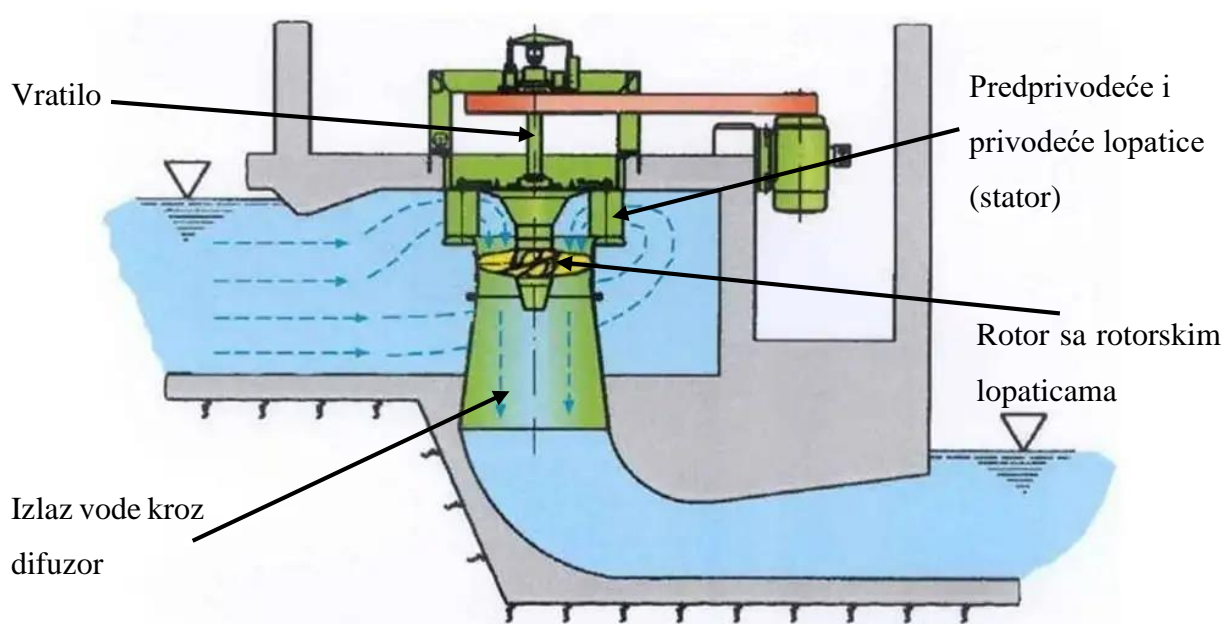
Najbitniji dio ove turbine je njezina spirala sa kolekcijom od kompleksno oblikovanih predprivodećih i privodećih lopatica. Lopatice su oblikovane tako da se s jedne strane lopatice prilikom mlaza vode stvara niski a s druge visoki tlak. Kako bi se regulirao protok fluida, lopatice se mogu i zakretati. Pravilno distribuirana voda iz spirale prolazi međuprostorom gdje se nalaze lopatice koje svojim oblikom osiguravaju pravilan smjer vode na ulazu u rotor. Rotor turbine također sadrži 12 do 17 lopatica. Voda ulazi radijalno u rotor, a izlazi aksijalno te se odvodi difuzorom u odvodni kanal. Upotrebom difuzora smanjuju se izlazni gubici turbine koji su povezani s kinetičkom energijom vode [5]. Francis-ova turbina obično ima okomito vratilo, jer se turbine s vodoravnim vratilom koriste samo kod manjih snaga.



Slika 2.4. Dijelovi Francis-ove turbine [8]

2.1.2 Kaplan-ova turbina

Godine 1913., Viktor Kaplan dizajnira i patentira propeleru turbinu s fiksnim rotorskim lopaticama. Konstrukciju dodatno unapređuje mogućnošću zakretanja rotorskih lopatica. Njemu u čast se propelerne turbine još nazivaju Kaplan-ove turbine. Ova turbina obično ima 10-12 predprivodećih i 20-32 privodećih lopatica, koje pravilno usmjeravaju vodu prema rotorskim lopaticama. Rotorske se, uz privodeće lopatice, mogu zakretati čime se kompenzira promjena kuta brzine kojom voda nastrujava lopaticu što ovaj tip turbine čini elastičnom u pogonu. Transport vode iz rotora vrši difuzor koji osim što smanjuje izlaznu energiju, povećava ukupnu iskoristivost turbine [5].



Slika 2.5. Dijelovi Kaplan-ove turbine [9]

Propelerne turbine spadaju u red aksijalnih turbina s primjenom pri malim neto padovima (do 70 metara) i velikim protocima. Koriste se primarno u ravninskim područjima, na rijekama koje kroz cijelu godinu osiguravaju visoki protok. Potrebni pad se osigurava izgradnjom umjetnih brana. Jedini nedostatak Kaplan turbine je kavitacija, koja nastaje zbog pada tlaka u cijevi.

Primjer korištenja u Hrvatskoj je HE Varaždin, prva od tri višenamjenske hidroelektrane na rijeci Dravi, koja ima ugrađena dva glavan agregata s Kaplan turbinama na koje se nadovezuju generatori raspoložive snage po 47 MW [10]. Navedena hidroelektrana je prikazana na slici 2.6.



Slika 2.6. HE Varaždin [10]

2.1.3 Arhimedov puž

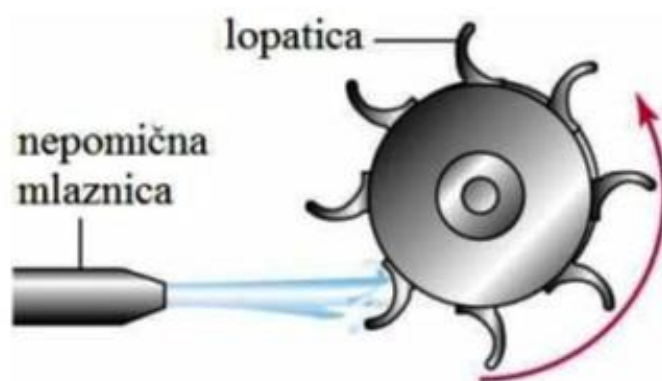
Arhimedov puž, također poznata kao pužna turbina, je reakcijska turbina koja se koristi za prijenos potencijalne energije više razine vode u kinetičku energiju okretanja puža silaženjem struje vode. Turbina se sastoji od rotora u obliku Arhimedovog puža koji se okreće u polukružnom kućištu. Voda koja teče kroz turbinu pritiskuje lopatice pa ta težina prisiljava turbinu da se okreće i stvara mehanički rad. Koristi se pri manjim protocima (do $10 \text{ m}^3/\text{s}$) i manjim neto padovima (od 1 metra do 10 metara). Zbog toga turbina ne proizvodi velike količine energije, no ima najmanje štetan učinak na prirodno stanište riba u rijekama na kojima se koristi ovakav tip turbine, zahvaljujući sporom okretanju lopatica [11].



Slika 2.7. Pužna turbina [11]

2.2 Akcijske turbine

Sile kojima lopatica rotora djeluje na fluid nazivamo akcijskim silama. Akcijske turbine, još nazivamo impulsne, koriste mlaznice za usmjeravanje toka vode i stvaranje kinetičke energije prije udara vode u lopatice. Pri udaru mlaza u lopatice dolazi do promjene smjera mlaza te se na taj način energija prebacuje sa vode na turbinu. Kod akcijskih turbina, nema pada tlaka koji bi uzrokovao moment, već je tlak isti na ulazu i izlazu iz turbine, a zakretni moment uzrokuje promjena količine gibanja zbog skretanja mlaza prilikom udara u lopaticu [2].



Slika 2.8. Prikaz rada akcijske turbine [12]

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

Razlikujemo sljedeće akcijske (impulsne) turbine:

- Pelton-ova turbina
- Turgo turbina
- Crossflow turbina, tj. turbina s križnim protokom
- Teslina turbina
- Jonval-ova turbina

2.2.1 Pelton-ova turbina

Pelton-ova turbina je izumljena 1878. god. Izumio ju je Lester Allan Pelton, koji se smatra glavnim predstavnikom turbina slobodnog mlaza ili akcijskih turbina [13]. Specifičnost turbine je da nisu konstanto opterećene, odnosno lopatice su u privremenom dodiru s mlazom.

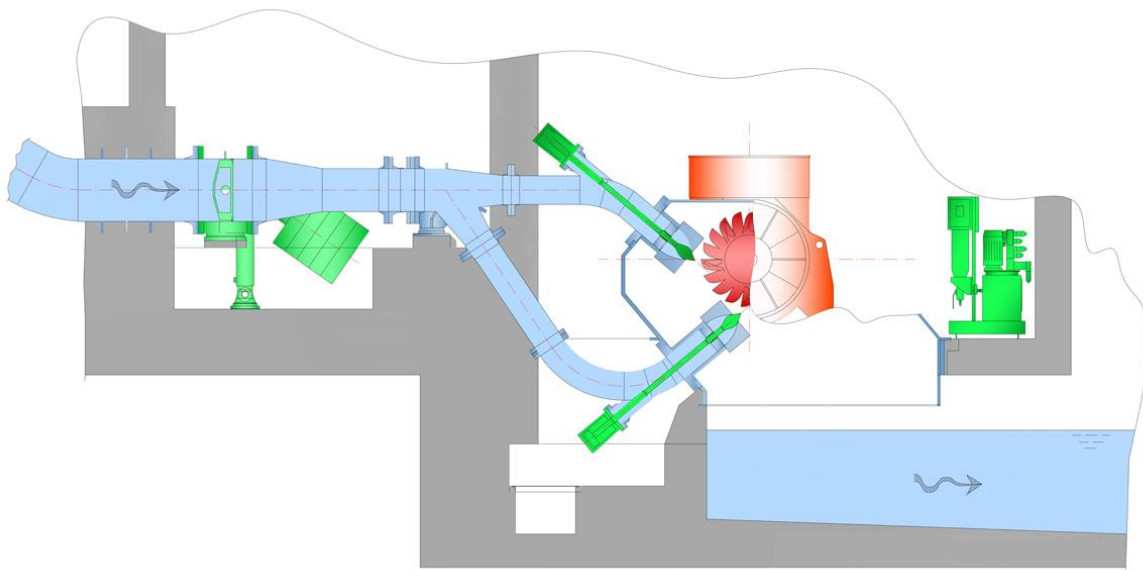
Konstruktivski gledano, Pelton-ove turbine su najjednostavnije vodne turbine koje se sastoje od privoda vode, sapnica i rotora. Rotor se obično sastoji od 12 do 40 lopatica, a svaka je oštrim bridom podijeljena na dva jednaka ovalna dijela, kao što je prikazano na slici 2.9. Takav oblik lopatice razdvaja mlaz vode u dva dijela od kojih svaki mlaz napušta lopaticu pod uglom od gotovo 180° . Sapnicama se vrši pretvorba potencijalne energije mirujuće vode u kinetičku energiju vodnog mlaza. Regulacija se izvodi pomicanjem regulacijske igle smještene unutar sapnice. Pomicanje regulacijske igle nipošto ne smije biti naglo jer bi nastao hidraulički udar koji bi izazvao neželjene posljedice [5].



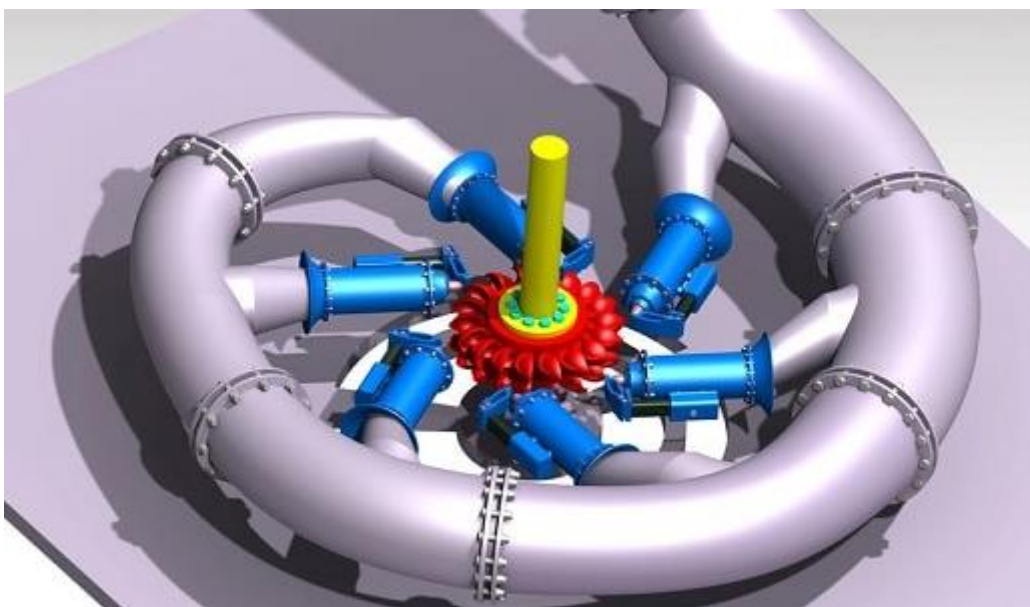
Slika 2.9. Lopatica Pelton-ove turbine [14]

Ovisno o konstrukciji, Pelton-ove turbine mogu imati jednu ili više sapnica, odnosno slobodnih mlazova, a rotor može biti postavljen na horizontalno ili vertikalno vratilo, sa jednim ili dva rotora. Povoljnija je izvedba s vertikalnim vratilom zbog dovoda vode po obodu rotora te postavljanjem rotora na minimalnu visinu iznad donje vode za iznos koji je direktni gubitak te stoga treba biti minimalan [5]. Horizontalna izvedba s dva privoda vode prikazana je na slici 2.10., a vertikalna izvedba s šest privoda vode na slici 2.11.

Pelton-ova turbina koristi se za najveće padove (preko 200 metara) i manje protoke vode. Ova turbina spada u one turbine koje imaju visok stupanj iskorištenja (preko 90%).



Slika 2.10. Horizontalna izvedba s 2 privoda [15]

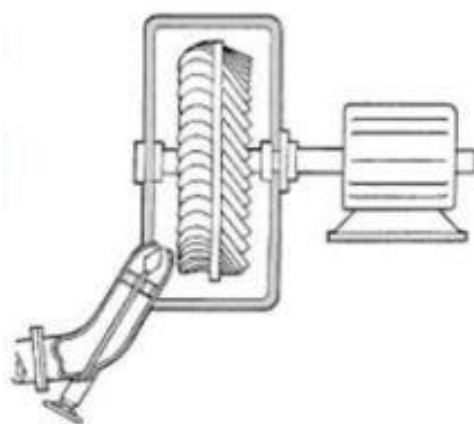


Slika 2.11. Vertikalna izvedba s 6 privoda [16]

2.2.2 Turgo turbina

Turgo turbina je slična Pelton-ovoj turbini, no razlikuje se po privodu mlaza vode koji prilazi rotoru bočno. Ove turbine se koriste za srednje padove vode od 50 do 250 metara. Stupanj iskoristivosti je manji nego kod Pelton-ove turbine, ali i dalje može dostići 87%.

Prednosti Turgo turbine nad Pelton turbini je manja cijena, prvo zbog jeftinijeg rotora, a drugo zbog toga što može podnijeti veće brzine protoka vode što smanjuje troškove ugradnje električnog generatora [17]. Ove turbine su česte kod malih hidroelektrana gdje se žele minimalizirati troškovi.

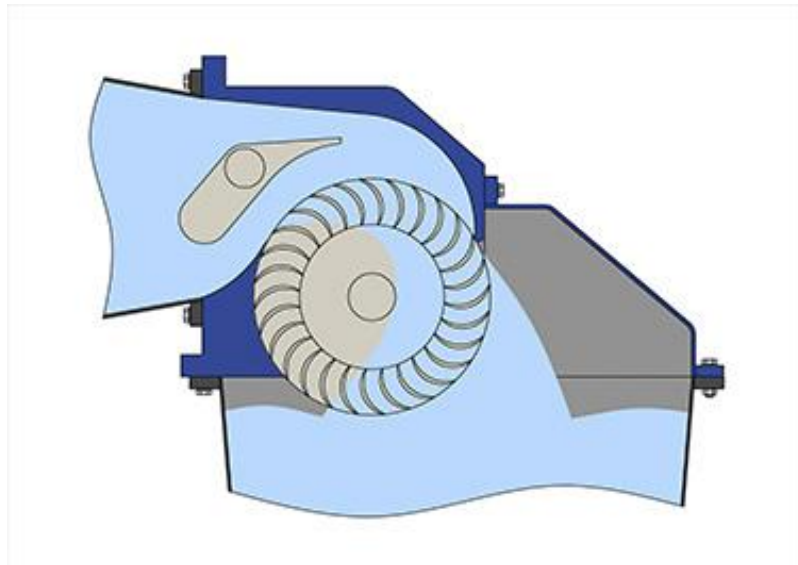


Slika 2.12. Turgo turbina s bočnim privodom vode [5]

2.2.3 Turbina s križnim protokom

Turbina s križnim presjekom (engl. *crossflow turbine*) također je jedna od jeftinijih vodnih turbina, uz Turgo turbinu, koja se koristi pri malim padovima i većim protocima. Razvio ju je njemački inženjer Fritz Ossberger, 1933. godine, te se po njemu često naziva i Ossberger-ovom turbinom. Razvodni sustav usmjerava vodni mlaz tako da voda ulazi u rotor kroz vijenac lopatica i nastavlja kroz drugi protok s unutrašnjosti rotora prema izlazu iz kućišta. U praksi ovakav tok vode omogućuje samočišćenje jer se nečistoće pod djelovanjem centrifugalne sile izbacuju iz rotora.

Ossberger-ove turbine se koriste za padove vode od 3 m do 200 m. Protok može biti od 0,03 m³/s do 13 m³/s, a razvijena snaga do 3000 kW [18]. Ove turbine ističu se dugogodišnjim vijekom trajanja, pri čemu nije potrebno nikakvo posebno održavanje.

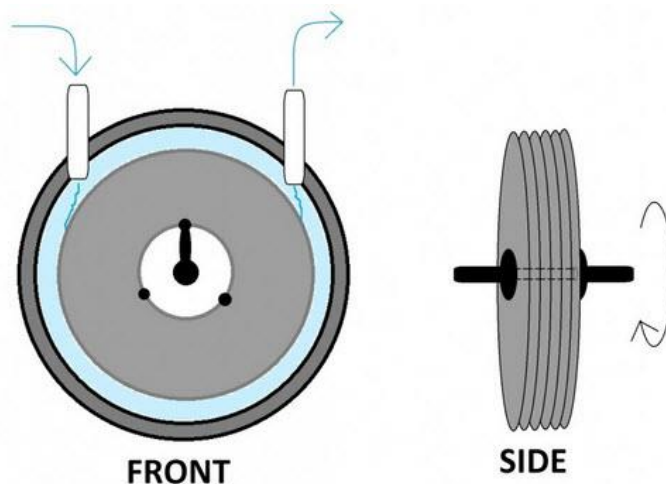


Slika 2.13. Ossberger-ova (crossflow) turbina [19]

2.2.4 Teslina turbina

Teslinu turbinu je patentirao Nikola Tesla 1913. godine. Specifičnost ove turbine je ta da ne sadrži rotorske lopatice, već se umjesto lopatica koristi djelovanje graničnih slojeva između fluida i višestrukih vrhova glatkih diskova. Zbog viskoziteta, odnosno trenja fluida, i privlačnih slojeva diska, granični dijelovi fluida djeluju na diskove. Kako bi to privlačno djelovanje bilo ostvarivo, postavljeni su uvjeti za malim razmakom između diskova, najviše 0,4 mm, i izrazita glatkoća površine [20].

Za vrijeme Teslina života turbina nije primjenjivana zbog ograničenosti materijala koji su tada bili dostupni (previše su se deformirali), ali danas je taj problem nadvladan i Teslina turbina je primjenjiva.



Slika 2.14. Teslina turbina sa prednje (front) i bočne (side) strane [20]

2.2.5 Jonval-ova turbina

Jonval-ova turbina je sagrađena 1885. godine. Bila je u pogonu 100 godina u Ženevi, na pumpnoj stanici za poznatu fontanu „Jet d'Eau“. Ukupno je postojalo takvih 17 vodnih turbina. U početku je bila nazivana „vodoravno vodeničko kolo“ zbog toga što je radno kolo postavljeno vodoravno te podsjeća na vodeničko kolo [21].

Kod Jonval-ove turbine voda struji paralelno s vratilom. Mlaz vode prolazi kroz fiksne statorske lopatice koje usmjeravaju taj mlaz prema rotorskim lopaticama. Posebnost ove turbine je ta da je prvi put korišten difuzor, u cilju iskorištenja cijelog raspoloživog pada [5].



Slika 2.15. Rotor Jonval-ove turbine [21]

3 DIFUZOR

3.1 Uloga difuzora

Difuzor ili odsisna cijev je komponenta svakog hidroenergetskog postrojenja s reakcijskom vodnom turbinom. Akcijske vodne turbine ne sadrže difuzor ili odsisnu cijev. Uloga difuzora je transport izlazne vode iz turbine od izlaznog presjeka rotora do odvodnog kanala, odnosno donje vode, i smanjenje gubitka izlazne energije, povećavajući ukupni stupanj iskoristivosti vodne turbine.

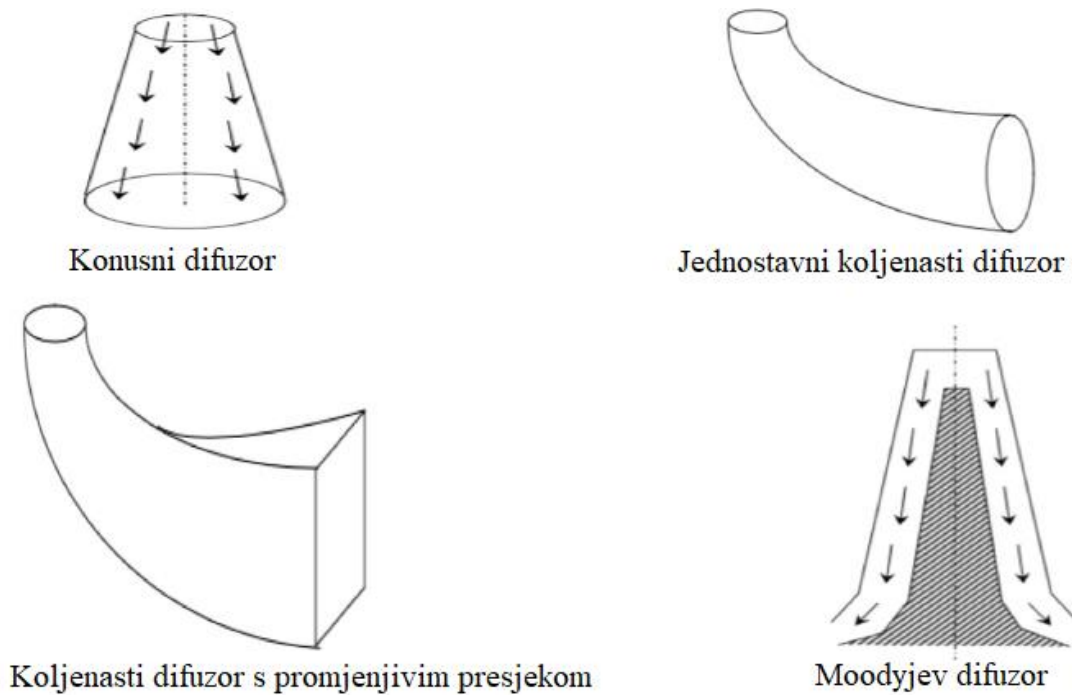
Difuzor omogućava postavljanje same turbine iznad razine donje vode i to bez gubitaka raspoloživog tlaka. Posljedica postavljanja je pad tlaka na ulaznom presjeku difuzora, a ovisno o visini turbine taj pad će biti manji ili veći [22]. Smanjenjem gubitaka izlazne energije difuzor povećava iskoristivost turbine. Dolazi do pada kinetičke energije vode zbog toga što difuzor smanjuje brzinu te istodobno povećava tlak vode zbog same geometrije difuzora. Poprečni presjek difuzora se povećava kako se odmičemo od ulaznog presjeka prema izlaznom. 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.

3.2 Vrste difuzora

Četiri su glavna tipa difuzora (Slika 3.1.):

1. Konusni difuzor
2. Jednostavni koljenasti difuzor
3. Moodyjev difuzor
4. Koljenasti difuzor s promjenjivim presjekom

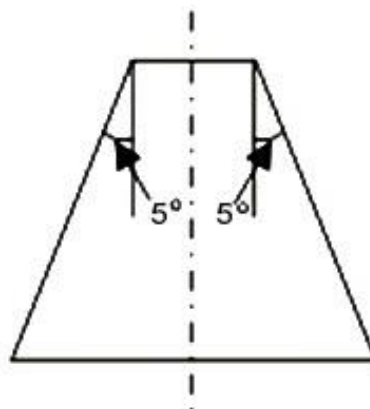
Na slici 3.1. prikazane su skice navedenih vrsta difuzora.



Slika 3.1. Vrste difuzora [23]

3.2.1 Konusni difuzor

Konusni difuzor izrađen je od mekog čelika. Ovaj difuzor je konusnog oblika sa većim izlaznim promjerom nego ulaznim, te kutom proširenja od 10° . Kut proširenja ne smije biti prevelik da ne dođe do odstupanja protoka od stijenke, a ne smije biti ni premali jer bi to rezultiralo većim dimenzijama, odnosno duljinom difuzora [22]. Obično se koristi kod Francis-ove turbine, a sama efikasnost doseže visokih 90%.



Slika 3.2. Prikaz kuta kod konusnog difuzora [24]

3.2.2 Jednostavni koljenasti difuzor

Oblik ovog difuzora podsjeća na koljeno. Kod ovog difuzora površina poprečnog presjeka ostaje ista, tj. ulaz i izlaz su istog kružnog poprečnog presjeka. Koristi se na niskim područjima te se postavlja odmah do odvodnog kanala što ga čini idealnim za korištenje u Kaplan-ovoj turbini. Efikasnost ovog difuzora iznosi oko 60% [22].

3.2.3 Moodyjev difuzor

Moodyjev difuzor karakterizira izlazni promjer koji je razdvojen na dva dijela. Sličan je konusnom difuzoru samo što Moodyjev difuzor sadrži dva izlazna promjera. Primarno se koristi kako bi se što više smanjilo vrtložno kretanje vode te samim time i gubici u turbini. Koristi se kod turbina sa vertikalno postavljenim vratilom, a efikasnost difuzora može doseći 88% [22].

3.2.4 Koljenasti difuzor s promjenjivim presjekom

Ovaj difuzor je nadogradnja na jednostavni koljenasti difuzor. Kod ovog difuzora ulaz je kružnog oblika, a izlaz pravokutnog. Vodoravni dio cijevi, kako bi se spriječio pristup zraka izlazu, je nagnut prema gore. Za razliku od jednostavnog koljenastog difuzora, ovaj difuzor ima promjenjiv poprečni presjek od ulaza do izlaza. Izlaz je i dalje ispod odvodnog kanala. Efikasnost je veća nego kod jednostavnog koljenastog difuzora i iznosi oko 70% [22].

4 GUBICI U TURBINI

Prema načinu nastajanja ukupni gubici se mogu podijeliti na:

- Hidrauličke gubitke
- Volumetričke gubitke
- Mehaničke gubitke

4.1 Hidraulički gubici

Hidraulički gubici su prisutni kao posljedica strujanja fluida te ih zbog toga nije moguće izbjeći, već ih je potrebno pokušati svesti na minimum, pravilnom konstrukcijom hidrauličkih dijelova. Dijele se na gubitke uslijed odvajanja struje i na gubitke trenja. Hidraulički gubici izražavaju se koeficijentom iskoristivosti η_h , a ukupni stupanj djelovanja turbine može se izraziti prema izrazu (4.1):

$$\eta_h = 1 - \frac{h_S + h_R + h_D + h_i}{h_n} \quad (4.1)$$

gdje je:

h_S – gubitak u statoru

h_R – gubitak u rotoru

h_D – gubitak u difuzoru

h_i – gubitak na izlazu iz difuzora

Gubici u spirali i prostoru sa predprivodećim lopaticama najvećim se dijelom odnose na gubitke trenja koje je moguće povezati s protokom na sljedeći način:

$$h_{\text{gub},i} = k_i \frac{1}{2g} \left(\frac{Q}{A_{\text{spi}}} \right)^2 \quad (4.2)$$

Gdje je:

Q – protok

$A_{spi,i}$ – površina ulaznog presjeka spirale

k_i – koeficijent lokalnog otpora

Ovisno o potrebi indeks „i“ može biti „spi“ za spiralu ili „ppl“ za predprivodeće lopatice.

Koeficijent lokalnog otpora je konstantan i hidraulički opisuje konstrukciju sa stanovišta gubitaka. Iz jednadžbe (4.2) vidljivo je da gubici rastu sa kvadratom protoka, a padaju pravilnom konstrukcijom spirale jer se pravilnom konstrukcijom osigurava niži koeficijent lokalnog otpora.

Gubitke u prstenu sa privodećim lopaticama je u nepomičnom položaju moguće opisati na prethodan način (izraz 4.2) povezujući ih sa kvadratom protoka i koeficijentom lokalnog otpora prostora prstena s privodećim lopaticama k_{PL} . Koeficijent lokalnog otpora u slučaju s privodećim lopaticama je promjenjive vrijednosti, tj. nije konstantan, zbog ovisnosti o položaju regulacijskih lopatica [5]. Gubici u prstenu sa privodećim lopaticama i gubici u spirali sa predprivodećim lopaticama mogu se nazvati i gubici u statoru. Gubici u rotoru sastoje se od gubitaka trenja i izlaznih gubitaka, gubitaka zbog skretanja (zavojni gubici) koji nastaju zbog odvajanja struje fluide od stijenke i sudarnih gubitaka koji nastaju kada se kut brzine w_1 ne podudara s ulaznim kutom lopatice β_{ul} zbog skretanja lopatice statora [25].

Gubitke trenja moguće je opisati sljedećim izrazom (4.3):

$$h_{gub,rot} = k_{rot} \frac{w_r^2}{2g} \quad (4.3)$$

Gdje je:

k_{rot} – koeficijent lokalnog otpora rotora

w_r – srednja relativna brzina u rotorskom kanalu

Koeficijent lokalnog otpora je konstantan kod rotora s nepomičnim lopaticama, a promjenjiv kod rotora s pomičnim lopaticama (npr. Kaplan-ova turbina).

Gubici uslijed odvajanja struje fluide nastaju zbog nepovoljnog nastrojavanja fluide na ulazni brid lopatice rotora. Kut pod kojim fluid nastrojava lopatice rotora određen je položajem

regulacijskih lopatica koji može biti različit od optimalnog. Pri dovoljno velikom odmaku od optimalnog kuta nastrujavanja dolazi do odvajanja struje fluida od lopatica rotora. Prema mnogim mjerenjima i istraživanjima utvrđeno je da odvajanje struje nastaje pri kutovima nastrujavanja većim od 16°. Kut koji nastaje odvajanjem struje naziva se „kriza uzgona“ [5].

Gubici odvajanja mogu se prikazati sljedećim izrazom (4.4):

$$h_{\text{gub,odv}} = k_{\text{rot,odv}} \frac{[w_1 \sin(\alpha_1 - \beta_u)]^2}{2g} \quad (4.4)$$

Gdje je:

$k_{\text{rot,odv}}$ – koeficijent lokalnog otpora koji uzima u obzir odvajanje

w_1 – relativna brzina na ulazu u rotor

β_u – kut pod kojim fluid relativnom brzinom nastrujava lopatice rotora

α_1 – kut tangente skeletnice profila

Pravilnim nastrujavanjem lopatica rotora ($\alpha_1 = \beta_u$) gubici odvajanja struje nestaju.

Gubici u difuzoru, slično kao i kod rotora, posljedica su gubitaka trenja i gubitaka uslijed odvajanja struje fluida od čvrste stijenke. Kod difuzora s koljenom dodatni problem predstavlja lokalni otpor koji treba prilagoditi gubicima trenja.

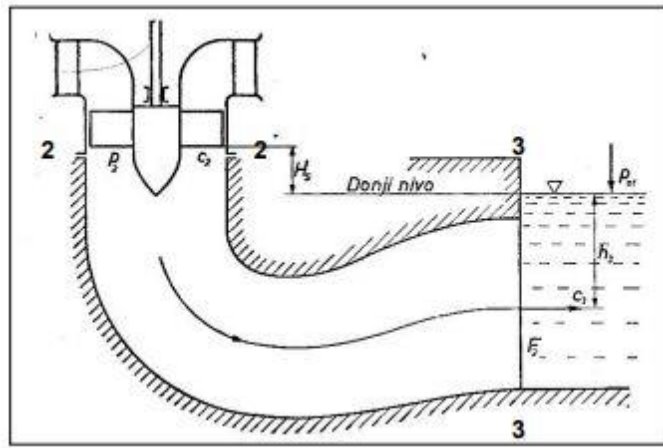
$$h_{\text{gub,dif}} = k_{\text{dif}} \frac{v_r^2}{2g} \quad (4.5)$$

Gdje je:

k_{dif} – koeficijent lokalnog otpora difuzora

v_2 – brzina na ulazu u difuzor

Korištenjem difuzora moguće je smanjiti izlazne gubitke energije u turbini. Na slici 4.1., presjek 2-2 predstavlja ulazni presjek difuzora, a presjek 3-3 predstavlja izlazni presjek difuzora [5].



Slika 4.1. Ulazni i izlazni presjeci difuzora [5]

Energija na izlazu turbine, ukoliko je izlazni presjek 2-2:

$$e_2 = \frac{v_2^2}{2} + \frac{p_a}{\rho} + g \cdot H_s \quad (4.6)$$

Gdje je:

v_2 – brzina na izlaznom presjeku 2-2

p_a – atmosferski tlak

g – ubrzanje sile teže

H_s – visinska razlika između ulaza difuzora i donje vode

ρ – gustoća vode

Energija na izlazu turbine, ukoliko je izlazni presjek 3-3:

$$e_3 = \frac{v_3^2}{2} + \frac{p_a}{\rho} \quad (4.7)$$

Gdje je:

v_3 – brzina na izlaznom presjeku 3-3

Oduzimanjem izraza 4.6 i izraza 4.7, dolazimo do sljedećeg izraza (4.8) za uštedu na izlaznoj energiji:

$$\Delta e = e_2 - e_3 - e_{gub,dif} \quad (4.8)$$

uvrštanjem pojedinih energija dobiva se:

$$\Delta e = g \cdot H_S + \frac{v_2^2 - v_3^2}{2} - g \cdot h_{\text{gub,dif}} \quad (4.9)$$

te na kraju:

$$\Delta e = g \cdot H_S + \frac{Q^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{A_2^2} - \frac{1}{A_3^2} \right) - g \cdot h_{\text{gub,dif}} \quad (4.10)$$

Konačno, ušteda na izlaznoj energiji korištenjem difuzora sastoji se od [5]:

- $g \cdot H_S$ – ušteda radi iskorištenja raspoloživog pada
- $\frac{Q^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{A_2^2} - \frac{1}{A_3^2} \right)$ – ušteda radi promjene protočnog presjeka
- $-g \cdot h_{\text{gub,dif}}$ – dodatni gubitak, neizbježan radi dodatne cijevi

gdje je:

g – ubrzanje sile teže

H_S – visina ulaza difuzora nad donjom vodom

Q – protok

A_2 – površina poprečnog presjeka 2-2

A_3 – površina poprečnog presjeka 3-3

4.2 Volumetrički gubici

Pre tlačne turbine rade s viškom tlaka na ulaznom presjeku rotora. Postoji mogućnost pretjecanja fluida iz područja višeg tlaka u područje nižeg tlaka, a da pritom ne prođe kroz međulopatični kanal. Posljedica takvog prestrujavanja je gubitak snage radi smanjene količine radno sposobnog fluida, a opisuje se koeficijentom volumetričke iskoristivosti η_v . Volumetrička iskoristivost je odnos protoka koji stvarno prolazi kroz rotor i protoka koji je raspoloživ, te je prikazana sljedećim izrazom (4.11):

$$\eta_v = \frac{Q_0 - q}{Q_0} = \frac{Q_R}{Q_0} \quad (4.11)$$

gdje je:

Q_0 – ukupna raspoloživa količina fluida

Q_R – radno sposobna količina fluida

Volumetričke gubitke moguće je smanjiti pravilnim dosjedom rotirajućih i nepomičnih dijelova ili upotrebom labirintnih brtvi [5].

4.3 Mehanički gubici

Ovi gubici nastaju trenjem u ležajevima vratila, trenjem vode u prostoru između rotora obočja te uslijed pogona pomoćnih mehanizama. Potrebno ih je minimalizirati, jer ako su oni veliki tada će se više energije vode trošiti na savladavanje ovih gubitaka umjesto na stvaranje mehaničkog rada. Mehanički gubici izraženi su koeficijentom mehaničke iskoristivosti:

$$\eta_m = \frac{P - P_{\text{gub,ležaja}}}{P} \quad (4.12)$$

Gdje je:

P – snaga dobivena na vratilu

$P_{\text{gub,ležaja}}$ – snaga nastala trenjem u ležajevima vratila

Zaključno, ukupni gubici jednaki su zbroju hidrauličkih, volumetričkih i mehaničkih gubitaka:

$$\eta_{uk} = \frac{P}{P_{hid}} = \eta_h \cdot \eta_v \cdot \eta_m \quad (4.13)$$

Izraz 4.13 prikazuje kako se ukupni gubici izražavaju preko ukupne korisnosti koja je jednaka omjeru snage dobivene na vratilu i hidrauličke snage fluida [5].

Osim u turbini, gubici se stvaraju i na putu strujanja vodnog toka. Ti gubici se dijele na lokalne i duljinske. Voda koja bi inače riječnim koritom strujala prema ušću, i čiji je generator strujanja visinska razlika izvora i ušća, na svom putu svu raspoloživu energiju pretvara u gubitke. Radi svoje duljine i nepravilnosti, riječno korito potroši svu vodnu energiju. Ukoliko se vodni tok usmjeri „hidraulički povoljnijim“ putem, u kojem su značajno manji gubici tada je dio energije moguće oduzeti vodi te konačno dobiti električnu energiju. Pod pogodnim putem se podrazumijeva cjevovod što je moguće kraće duljine i većeg promjera, veće glatkoće te sa što manje lokalnih gubitaka.

Lokalni gubici se računaju prema izrazu (4.14):

$$h_{gub,lok} = k_{lok} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (4.14)$$

gdje je k_{lok} koeficijent lokalnih gubitaka, koji se određuje eksperimentalno [26].

Duljinski gubici se računaju prema izrazu (4.15):

$$h_{gub,duz} = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (4.15)$$

gdje je:

λ – koeficijent hrapavosti

D – promjer cijevi

L – duljina cijevi

v – brzina strujanja

5 NUMERIČKA ANALIZA STRUJANJA KROZ DIFUZOR TURBINE

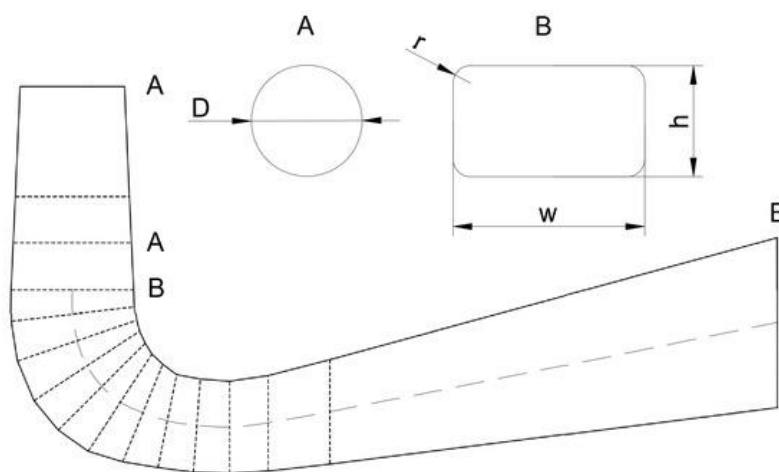
Numerička analiza je grana numeričke matematike koja se bavi pronalaženjem i unaprjeđivanjem algoritama za numeričko izračunavanje matematičke analize. Potrebe za numeričkim rješavanjem su višestruke. Često se koriste za rješavanje matematičkih problema koji bi standardnim rješavanjem zbog svoje veličine predugo trajali, npr. sustav od 1000 jednažbi s 1000 nepoznanica [27].

Korištenje računalne dinamike fluida (CFD) pruža korisnicima mogućnost simulacije performansi proizvoda u širokom nizu radnih uvjeta. To inženjerima daje razumijevanje tlaka, protoka i toplinskih karakteristika njihovih proizvoda. Na taj način je moguće poboljšati izvedbu i pouzdanost proizvoda. S obzirom da su dizajni koji se istražuju najčešće veoma složeni potrebno je poštovati niz pravila izrade računalnih simulacija kako bi se virtualno generiralo točno rješenje za fizički fenomen.

Ansys je Američka tvrtka koja razvija CAE (Compture-Aided Engineering) računalne programe koji pomažu inženjerima i dizajnerima pri optimiziranju razvojnog procesa proizvoda u raznim industrijama. Većina Ansys simulacija izvedeno je u Ansys Workbench sistemu, koji je jedan od najprodavanijih proizvoda poduzeća. Ansys je razvio mnogo računalnih programa za različite fokuse simulacija, a za potrebe ovog završnog rada korišten je program Ansys Fluent, pomoću kojeg se odradio cjelokupni zadatak završnog rada. Ansys Fluent je vodeći softver za računarsku dinamiku fluida (CFD) poznat po svom naprednom fizičkom modeliranju i točnosti. Koristi se za modeliranje protoka fluida, prijenosa topline i mase, kemijskih reakcija itd. Fluent nudi moderno sučelje koje usmjerava obradu CFD procesa unutar jednog radnog tijeka prozora. Poznat je po svojim naprednim mogućnostima modeliranja geometrije. Velika prednost ovog programa je da se simulacije za velike modele mogu jednostavno riješiti na više procesora računala, čime se postiže visoka efikasnost i točnost izrade željene simulacije [28].

5.1 Izrada geometrije

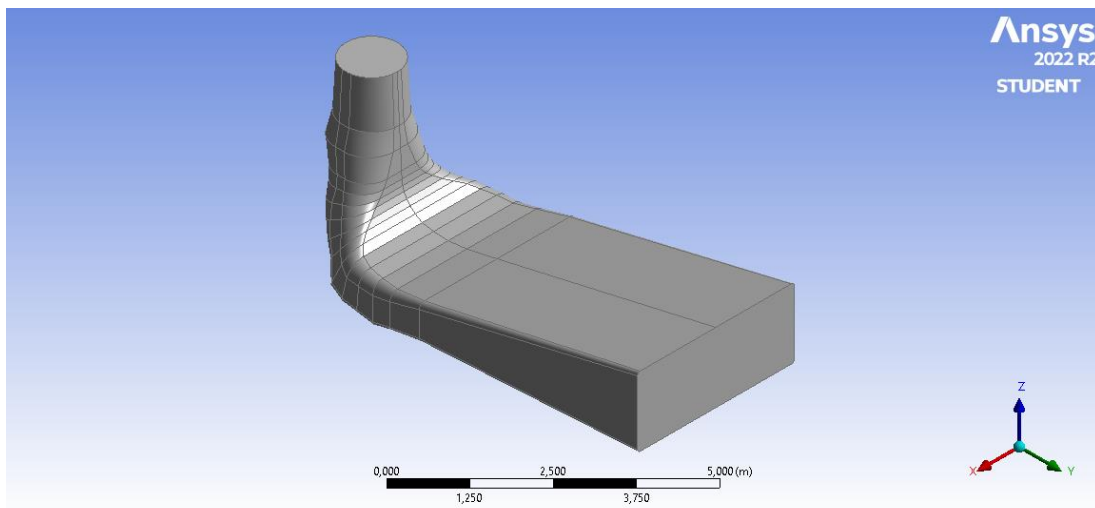
U sklopu zadatka nije se izrađivala geometrija, već je preuzeta gotova geometrija. Preuzeta geometrija je optimizirana geometrija difuzora vodne turbine koja će se uspoređivati s geometrijom originalnog difuzora simulacijama. Kod same optimizacije difuzora, geometrija nije zaglađena već su samo optimizirane širine originalnih poprečnih presjeka, koji su prikazani na slici 5.1., kako bi se smanjili gubici u koljenu [29].



Slika 5.1. Difuzor sa karakterističnim presjecima za optimizaciju [29]

Geometrija može biti izrađena, odnosno nacrtana, npr. u programu SolidWorks pa će stoga imati naziv npr. geometrija.SLDPRT. Datoteku takvog naziva potrebno je pretvoriti u datoteku koju Ansys Fluent može otvoriti, npr. geometrija.STEP.

Zadana geometrija se otvara u programu Design Modeler. Design Modeler pruža mogućnost modeliranja geometrija za stvaranje simulacije. Detaljniji opis izrade geometrije difuzora neće se vršiti u sklopu ovog rada jer je preuzeta gotova geometrija. Izrada numeričke mreže prikazat će se samo za jednu geometriju, odnosno geometriju optimiziranog difuzora.

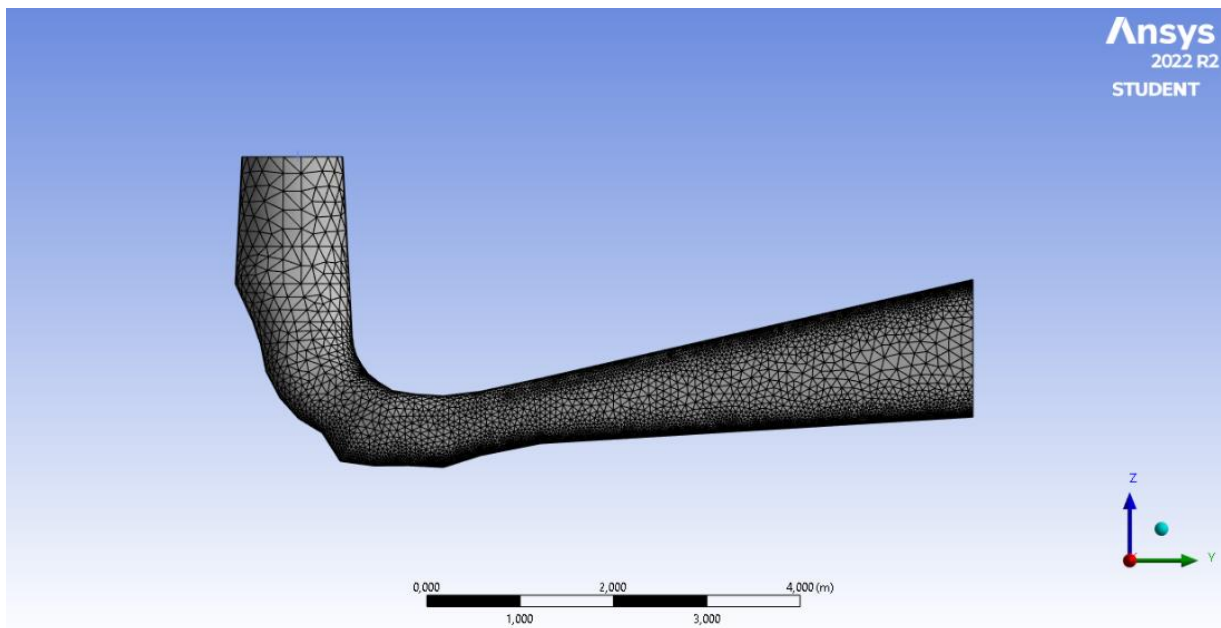


Slika 5.2. Geometrija difuzora u izometriji

5.2 Izrada numeričke mreže

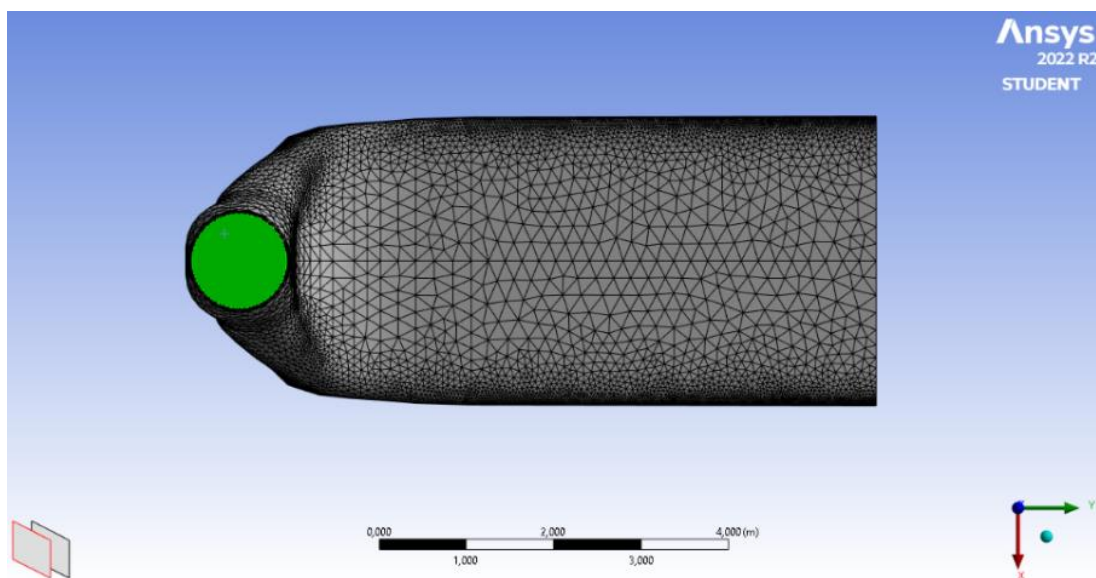
Nakon preuzimanja geometrije, krećemo sa izradom numeričke mreže. Za kreiranje numeričke mreže koristimo Ansys Meshing. Ovaj modul automatski stvara numeričku mrežu. Za potrebe rješavanja zadatka potrebno je uraditi određene promjene kako bi dobili što precizniju numeričku mrežu. Unutar Meshinga mijenjamo preferencu „Mechanical“ u „CFD“, te za rješavač analize postavimo „Fluent“. Computational Fluid Dynamics (CFD) označava dobivanje podataka za protok fluida rješavanjem Navier-Stokesovih jednačbi te stvaranja simulacije prema dobivenim rezultatima.

Kako bi dobili što precizniju numeričku mrežu, potrebno je imati što više čvorova i elemenata. Navedeno postizemo smanjenjem veličine jednog elementa na 0,2 m. Konačno, numerička mreža ovog zadatka sastoji se od 55 188 čvorova i 276 230 elemenata, što se jasno vidi na slici 5.3.

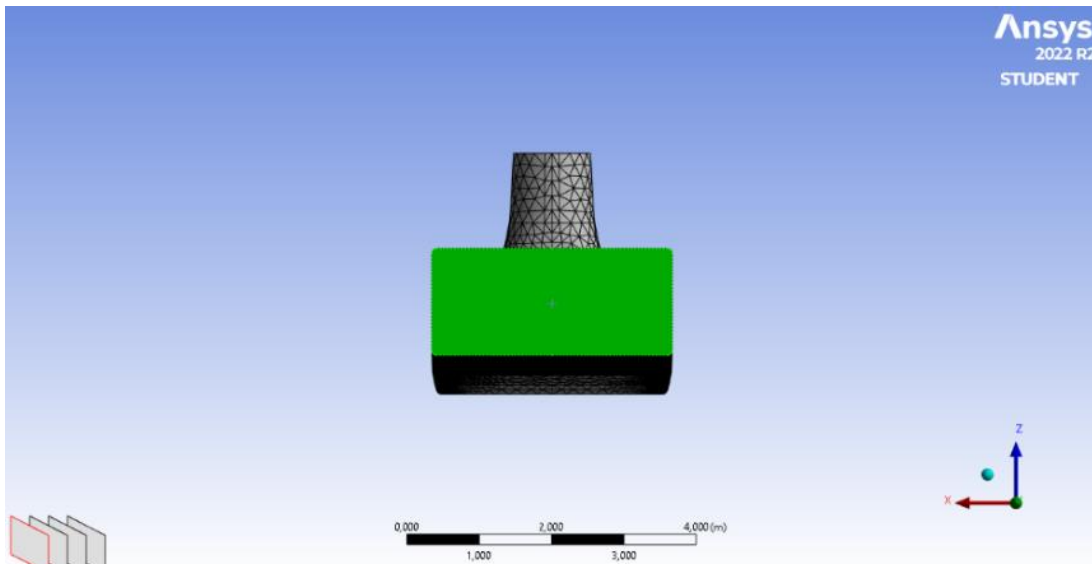


Slika 5.3. Prikaz numeričke mreže u nacrtu

Za potrebe lakšeg rada, ulaznom presjeku difuzora daje se naziv „Inlet“, a izlaznom presjeku difuzora „Outlet“. Ti dijelovi su prikazani na slikama 5.4. i 5.5.

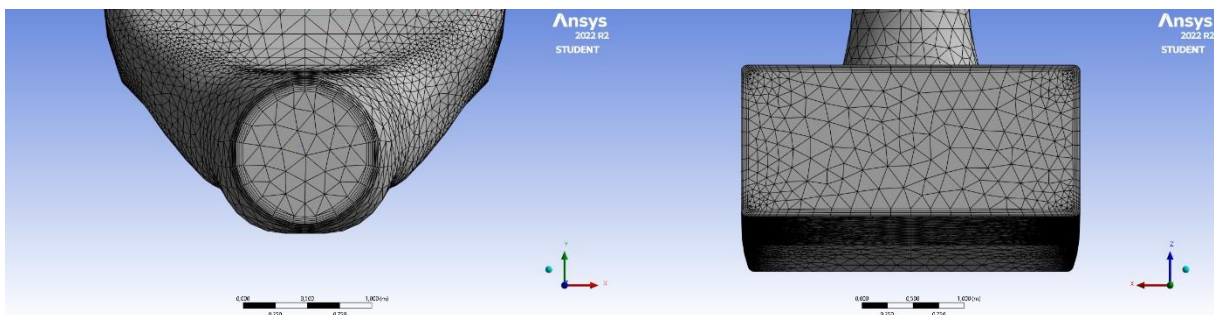


Slika 5.4. Inlet



Slika 5.5. Outlet

Sljedeće, potrebno je dodati inflaciju, na površinama „zida“ difuzora, kojom se postiže kreiranje ravnomjernih elemenata na površinama gdje je brzina strujanja jednaka nuli, u smjeru normale na graničnim dijelovima numeričke mreže. Inflacijom se bolje opisuje ponašanje fluida u graničnom sloju. Unutar funkcije „Inflation“ koristit ćemo preferencu „First Layer Thickness“ i staviti debljinu slojeva 0,01 m radi bolje simulacije fluida. „Inlet“ i „Outlet“ su jedine površine koje inflacija ne zahvaća jer na njima imamo brzinu strujanja, dok na ostalim površinama, koje čine zid, nema brzine.



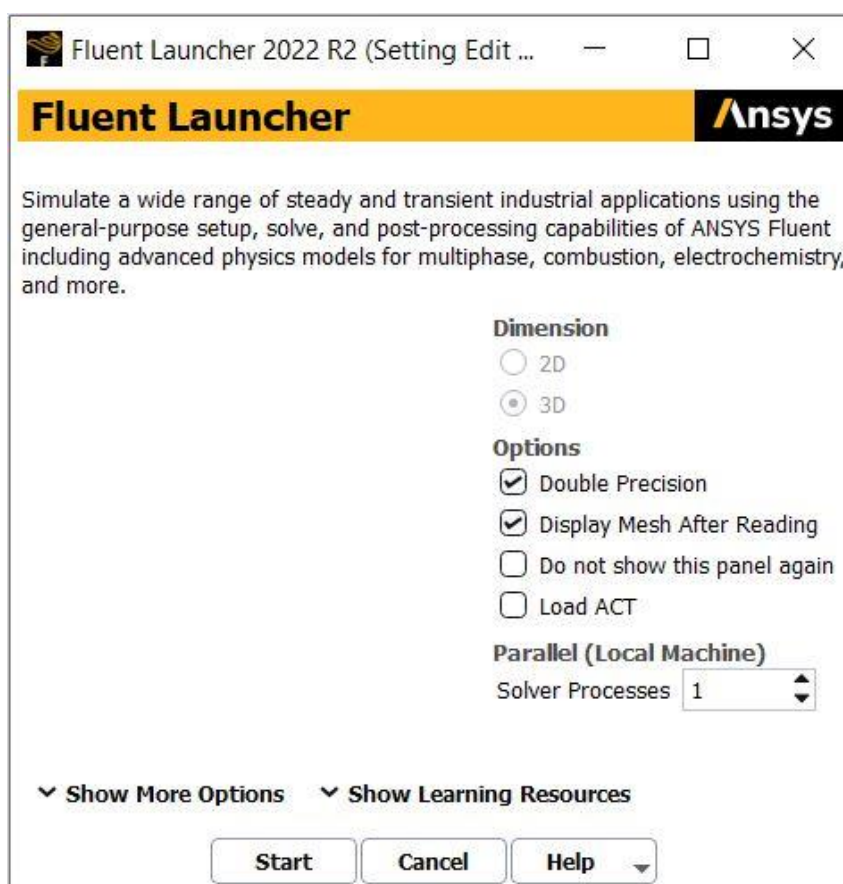
Slika 5.6. Inflacija na ulaznom (lijevo) i izlaznom (desno) presjeku

Slika 5.6., uz inflaciju, prikazuje izgled numeričke mreže sa različitih pogleda, bočno i odozgo. Pogledom na ulazni i izlazni presjek vidljiva je inflacija zida difuzora.

5.3 Izrada simulacije

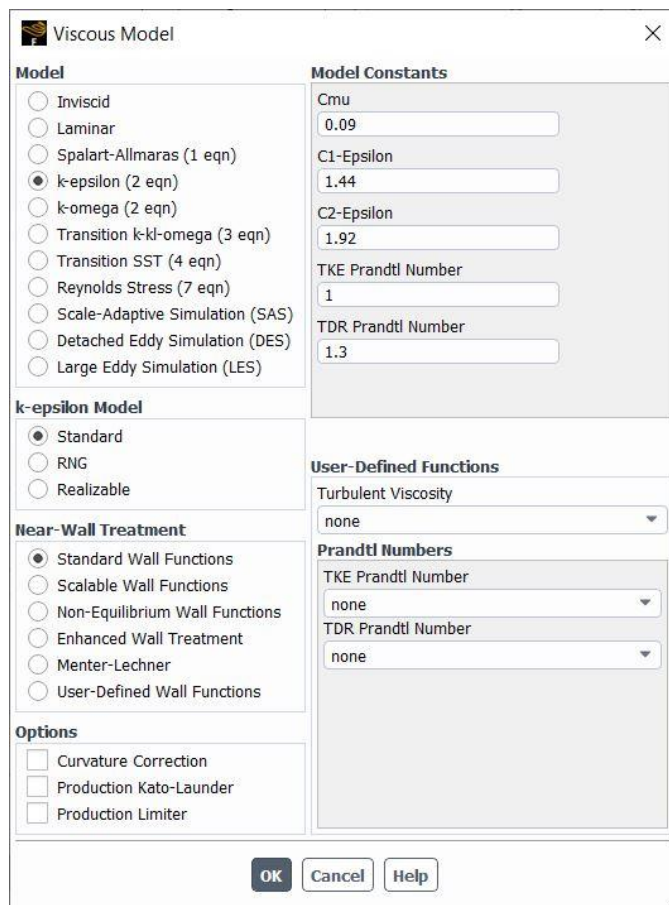
Nakon izrade numeričke mreže, u Workbench-u dolazimo do rješavanja problema preko Fluent-a. Radi usporedbe pojedinih tlakova i brzine, vrši se usporedba originalnog difuzora i optimiziranog difuzora.

U modul „Fluent“ smo dodali numeričku mrežu zadanog difuzora te je sada potrebno pokrenuti rješavač. Otvaranjem Fluent-a odabiremo mogućnost računanja Navier-Stokesovih jednadžbi s dvostrukom preciznošću, radi preciznijeg dobivanja rezultata. Također postoji mogućnost paralelnog računanja sa više jezgara računala kako se ne bi preopteretilo računalo te da bi se rezultat dobio još brže, što se preporuča kod većih količina elemenata u numeričkoj mreži. Navedene postavke su prikazane na slici 5.7.



Slika 5.7. Fluent Launcher

Prije samog rješavanja Navier-Stokesovih jednažbi potrebno je postaviti određene postavke. Prvo što je bitno je odabir turbulentnog modela. Odabran je k-epsilon turbulentni model sa dvije dodatne jednažbe koje zapravo opisuju turbulentno strujanje. Odabir k-epsilon modela je prikazan na slici 5.8.



Slika 5.8. Odabir modela strujanja

Sljedeća postavka koju treba definirati je materijal fluida. Za materijal fluida odabiremo vodu, tako što dodamo materijal iz „Fluent Database“. Nakon odabira vode kao materijal fluida, potrebno je definirati parametre rubnih uvjeta. Za „Inlet“ zadani volumni protok iznosi $10 \text{ m}^3/\text{s}$. Odabiremo „mass flow-inlet“, što znači da je potrebno preračunati volumni protok u maseni. Program nas traži iznos ulazne brzine pa ju je potrebno izračunati uzimajući u obzir gustoću vode:

$$\dot{V} = 10 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\rho = 998,2 \text{ kg/m}^3$$

$$\dot{m} = \dot{V} \cdot \rho = 10 \cdot 998,2 = 9982 \text{ kg/s} \quad (5.1)$$

Za „Outlet“ odabiremo postavku „pressure-outlet“, gdje je definirani atmosferski tlak kao izlazni tlak. Za stjenku difuzora odabiremo uvjet „Wall“ te u postavkama odabiremo opciju „No Slip“, koja definira da je brzina na stjenkama, odnosno zidu, jednaka nuli.

Prije pokretanja simulacije još je potrebno inicijalizirati rješenje. Definiramo inicijalizaciju proračuna sa ulaznog presjeka difuzora čime se postiže namještanje proračuna prema definiranim ulaznim postavkama te možemo provjeriti da li odgovara zadana brzina strujanja sa brzinom strujanja po z-osi (Slika 5.9.).

Initial Values	
Gauge Pressure [Pa]	0
X Velocity [m/s]	-1.20083e-16
Y Velocity [m/s]	-1.065366e-15
Z Velocity [m/s]	-11.03958
Turbulent Kinetic Energy [m ² /s ²]	0.457021
Turbulent Dissipation Rate [m ² /s ³]	1870.817

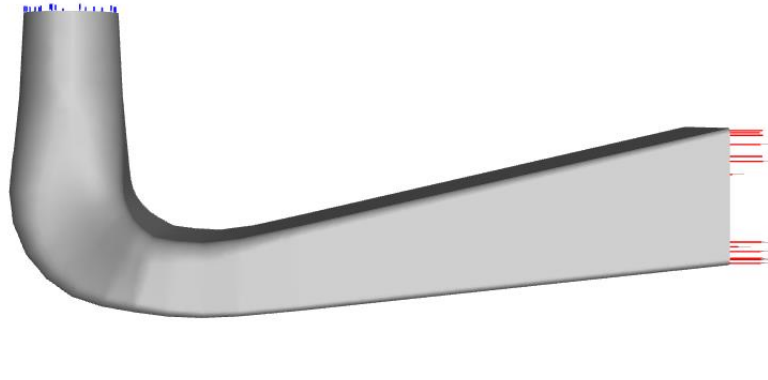
Slika 5.9. Inicijalizacija od ulaznog presjeka

Da bi simulacija što kvalitetnije prikazala realna stanja, dodajemo 5 presječenih ravnina na kojima će se vidjeti promjene brzine strujanja fluida i razine tlaka. Za pokretanje simulacije, određujemo što veći broj iteracija za rješavanje jednadžbi te se konačno može pokrenuti proračun. Za potrebe rješavanja ovog zadatka određeno je 1000 iteracija.

6 REZULTATI

U svrhu izrade završnog rada, zadatak je usporedba strujanja kod dva različita difuzora. Prvi difuzor je originalni difuzor (Slika 6.1.), a drugi difuzor je optimizirani difuzor (Slika 5.2. i 5.3.).

Ansys
2022 R2
STUDENT

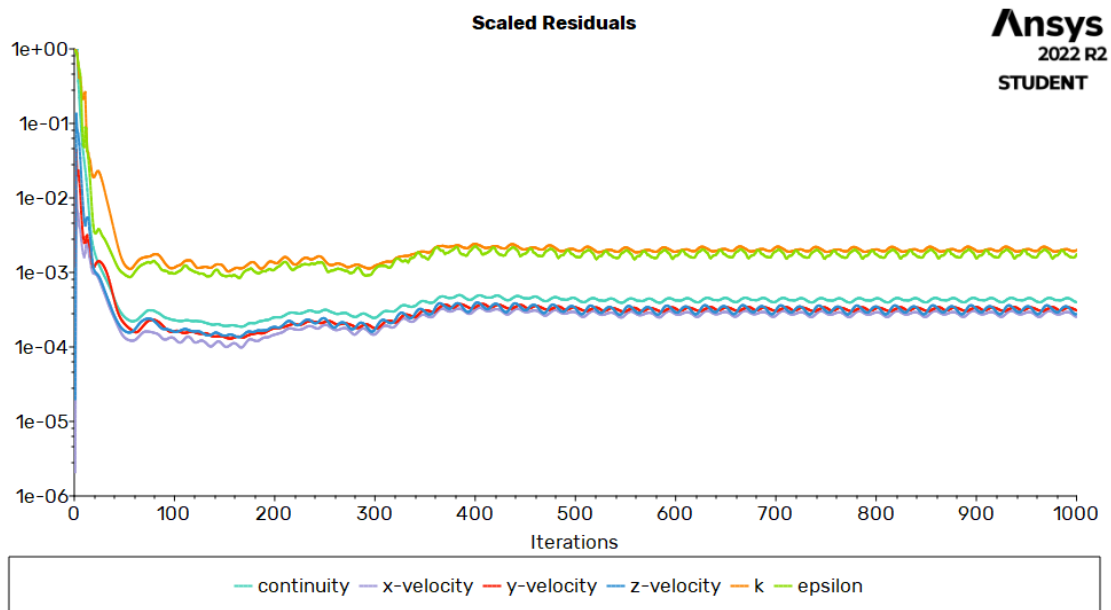


Slika 6.1. Originalan difuzor

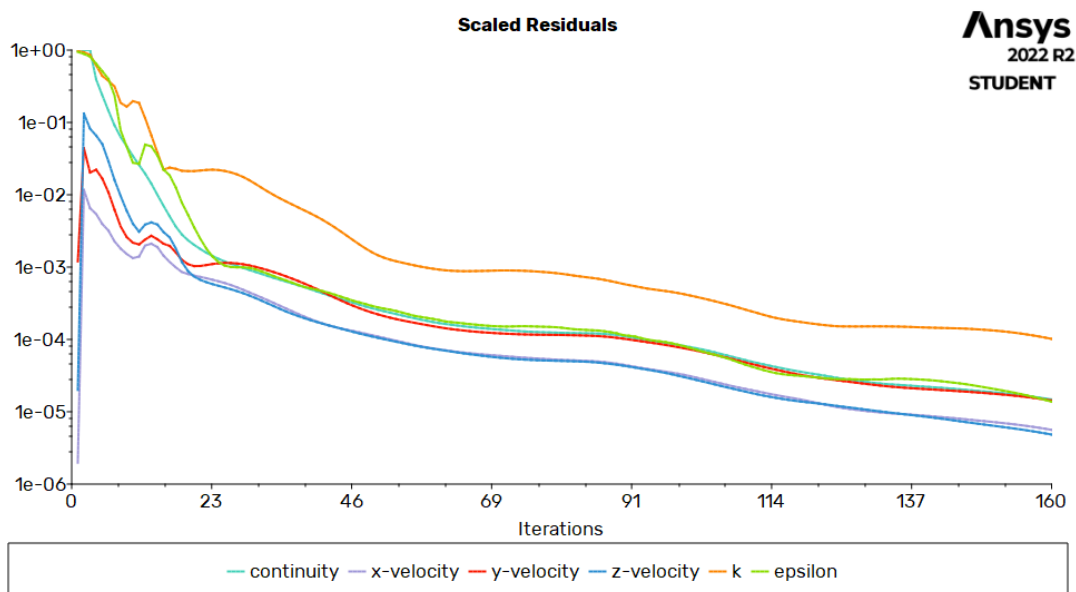
Radi usporedbe difuzora, kod simulacije se koriste iste vrijednosti za brzinu i tlak te iste postavke za ulazni i izlazni presjek i stjenku difuzora. Prema izrazu 5.1, maseni protok iznosi 9982 kg/s. Definirani izlazni tlak je atmosferski u iznosu od 101 325 Pa, a strujanje je turbulentno (koristimo k-epsilon model).

6.1 Graf konvergencije

Po završetku izračuna, program kao rješenje izbacuje graf konvergencije, koji prikazuje je li rješenje konvergiralo, tj. jesu li residuali, koji predstavljaju razliku između promatranih i predviđenih vrijednosti, zadovoljili kriterij koji je postavljen programskim parametrima za izradu simulacije.



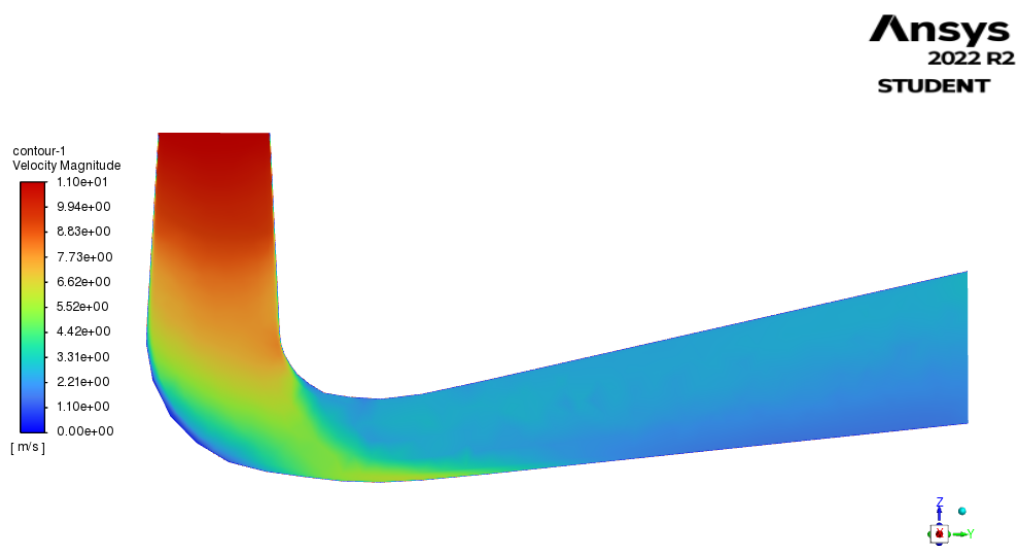
Slika 6.2. Graf konvergencije originalnog difuzora



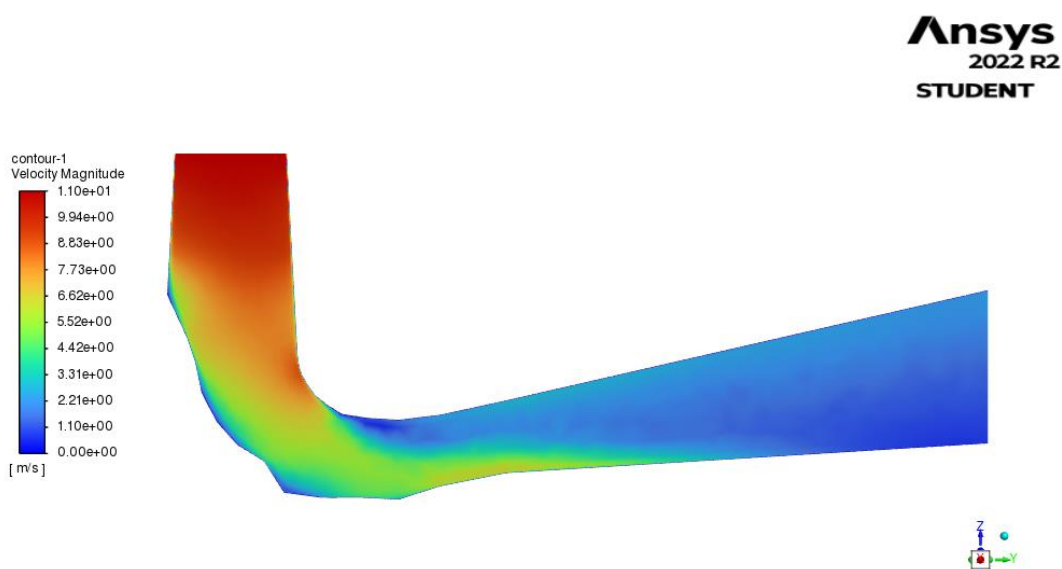
Slika 6.3. Graf konvergencije optimiziranog difuzora

Na slici 6.2. vidljiva je stabilnost rješenja za originalni difuzor nakon 1000 iteracija. Daljnja poboljšanja bi bila moguća prilagodbom numeričke mreže ili postavki numeričke simulacije, no zbog ograničenja studentske licence i dobivenih malih oscilacija usvajamo dobivena rješenja. Na slici 6.3. prikazana je konvergencija rješenja za optimizirani difuzor. U ovom slučaju dobiva se konvergirano rješenje nakon 160 iteracija.

6.2 Brzine strujanja fluida

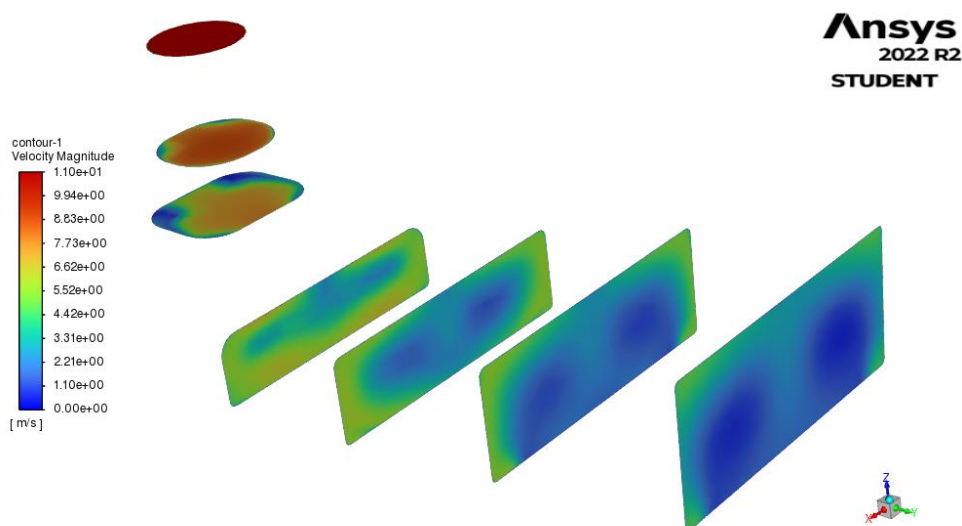


Slika 6.4. Konture brzine strujanja kod originalnog difuzora

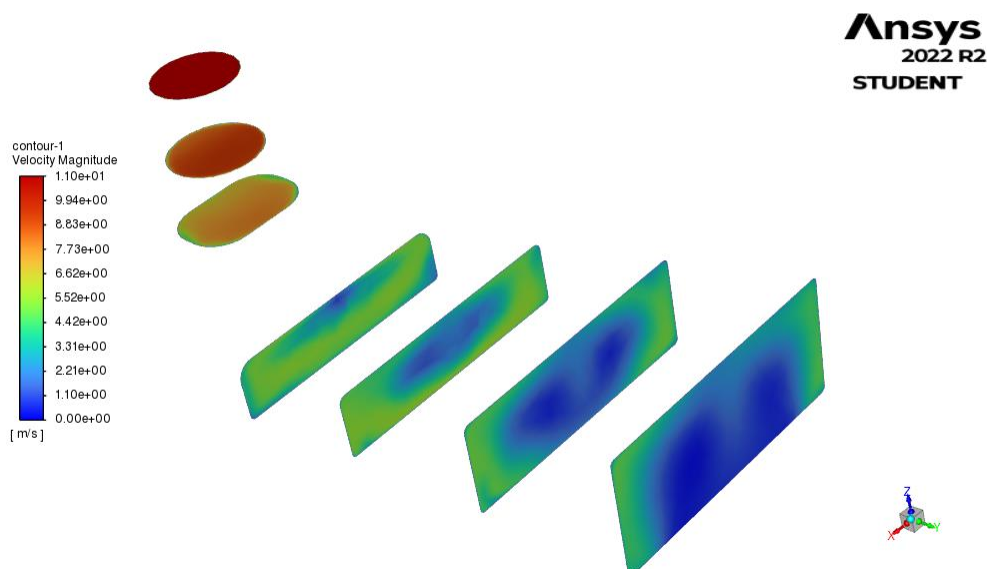


Slika 6.5. Konture brzine strujanja kod optimiziranog difuzora

Iz slika 6.4. i 6.5. vidljivo je da je brzina strujanja kod oba difuzora najveća na ulazu, a najmanja na izlazu iz difuzora. Razlika brzina je vidljiva u „koljenu“ difuzora, gdje veća brzina strujanja se postiže kod optimiziranog difuzora zbog manjih poprečnih presjeka na koljenu. Cilj je postići izlaznu brzinu što manju, što postižu oba difuzora, no kod optimiziranog difuzora (Slika 6.5.) vidimo da je brzina strujanja na izlazu postigla manju vrijednost u odnosu na originalni difuzor.

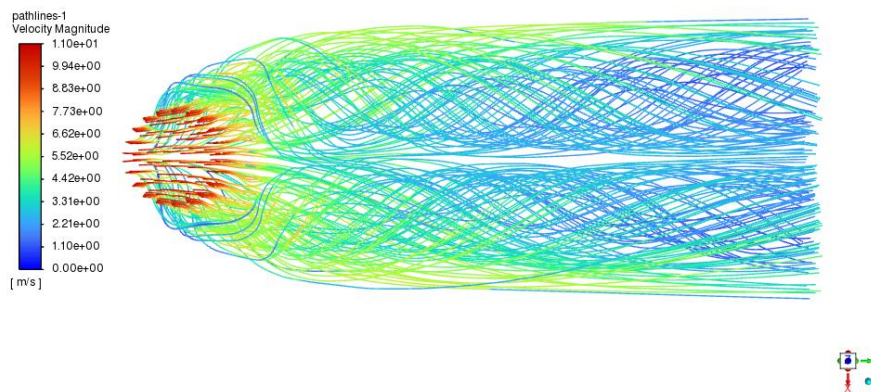
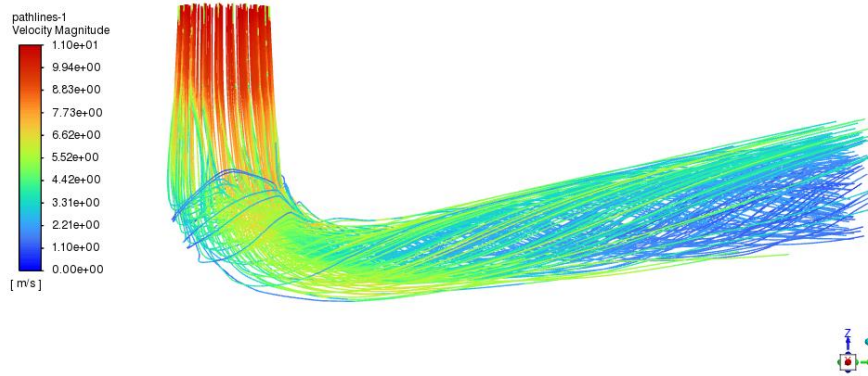
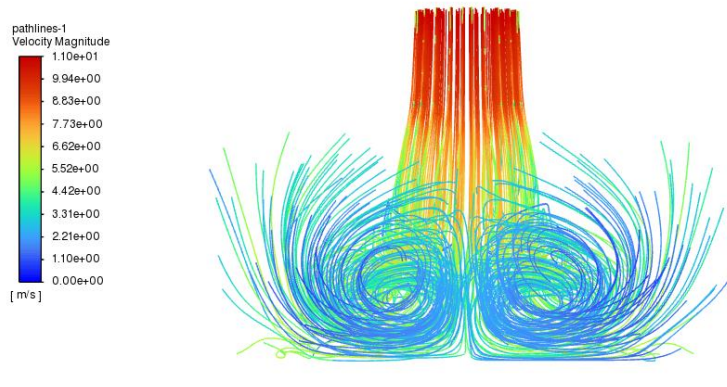


Slika 6.6. Konture brzina na različitim presjecima kod originalnog difuzora



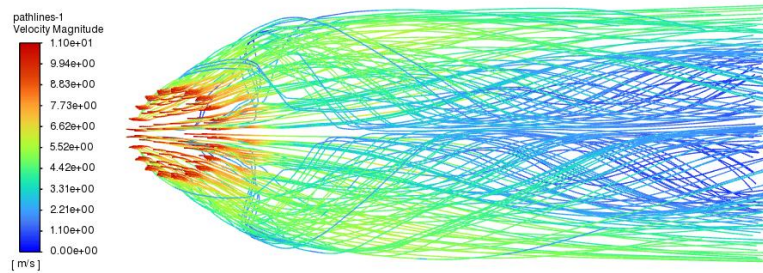
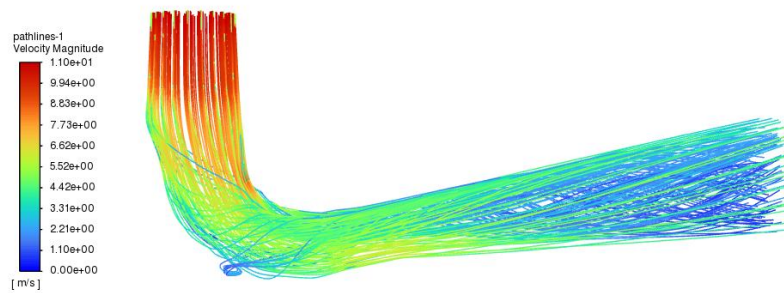
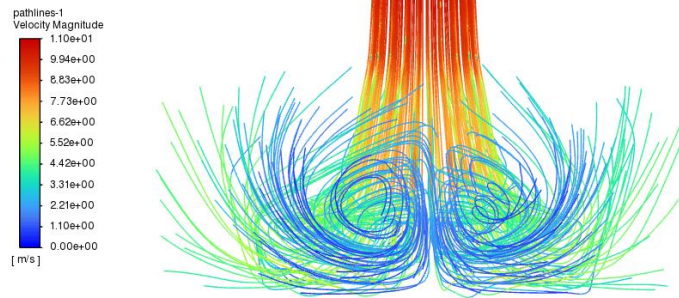
Slika 6.7. Konture brzina na različitim presjecima kod optimiziranog difuzora

Slike 6.6. i 6.7. prikazuju intenzitet brzine strujanja vode na različitim presjecima kod pojedinog difuzora. Crvena boja označava velike brzine, a plava minimalne.



Slika 6.8. Strujnice brzine kod originalnog difuzora

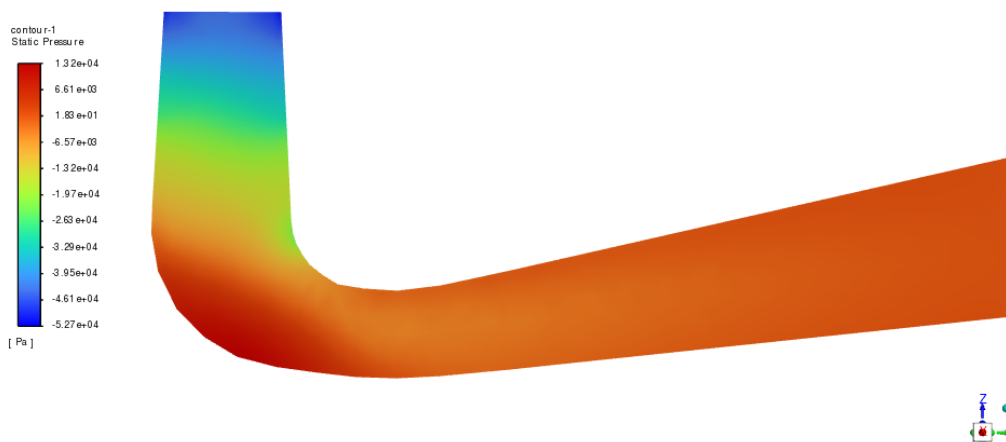
Slika 6.8. prikazuje strujnice čestica vode kod originalnog difuzora u različitim pogledima.



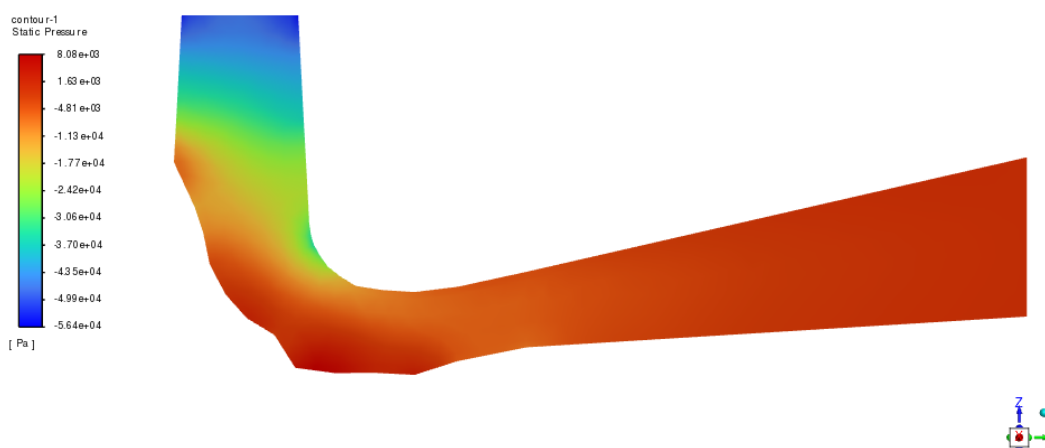
Slika 6.9. Strujnice brzine kod optimiziranog difuzora

Slika 6.9. prikazuje strujnice čestica vode kod optimiziranog difuzora, također u različitim pogledima. Prikazom strujnica jasno je vidljivo kretanje fluida kroz oba difuzora (Slike 6.8. i 6.9.) te je jasno vidljivo vrtloženje fluida u difuzoru. Pad brzine strujanja fluida na izlazu difuzora znači da je došlo do uštede energije.

6.3 Statički tlak



Slika 6.10. Konture statičkog tlaka kod originalnog difuzora

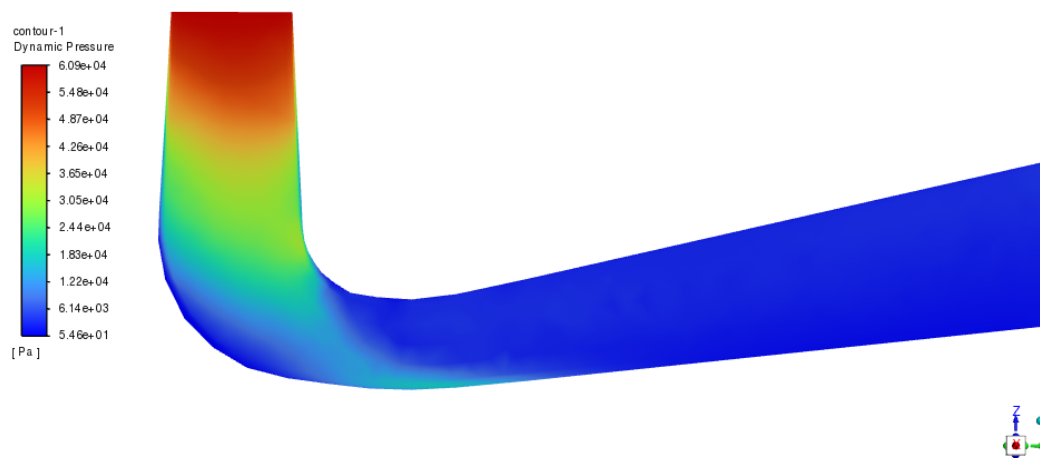


Slika 6.11. Konture statičkog tlaka kod optimiziranog difuzora

Kada fluid miruje, tj. kada je brzina strujanja nula, na fluid djeluje samo statički tlak. Stoga možemo vidjeti da je kod oba difuzora (Slike 6.10. i 6.11.) na ulazu u difuzor statički tlak najmanji, a najveći je na donjoj površini koljena difuzora. Optimizacijom difuzora postigli smo manji statički tlak u koljenu. Statički tlak se povećava prema izlazu, odnosno povećava se smanjenjem brzine strujanja fluida.

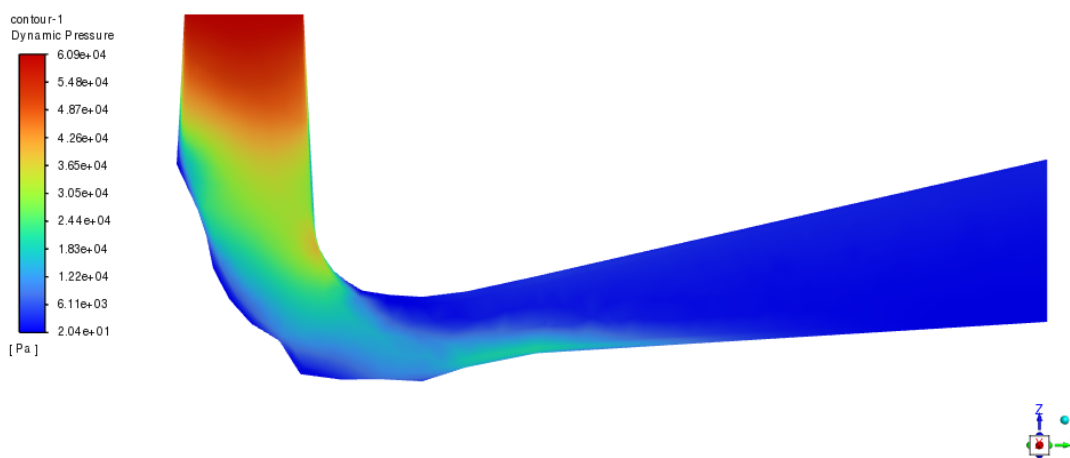
6.4 Dinamički tlak

Ansys
2022 R2
STUDENT



Slika 6.12. Konture dinamičkog tlaka kod originalnog difuzora

Ansys
2022 R2
STUDENT

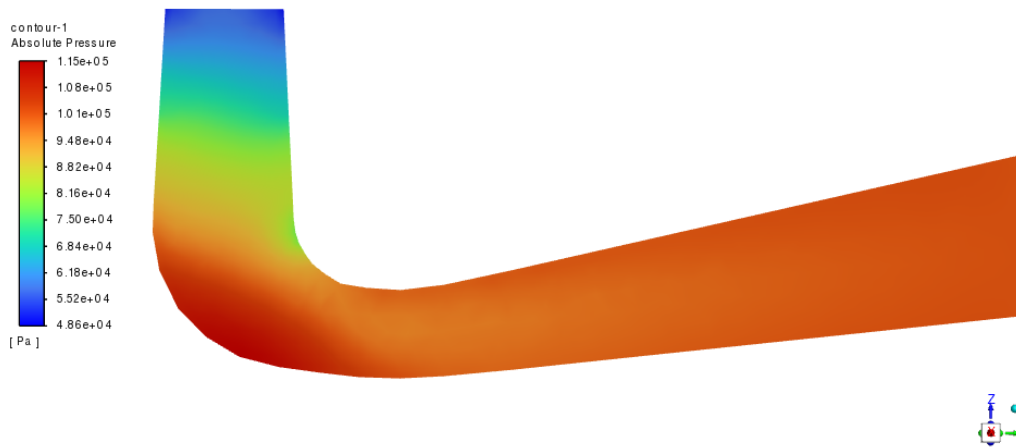


Slika 6.13. Konture dinamičkog tlaka kod optimiziranog difuzora

Suprotno od statičkog tlaka, dinamički tlak prati intenzitet brzine strujanja te se smanjuje od ulaznog presjeka difuzora prema izlaznom presjeku. Na slikama 6.12. i 6.13. prikazane su konture dinamičkog tlaka kod originalnog i optimiziranog difuzora. Kod optimiziranog difuzora dinamički tlak je u koljenu još dosta velik zbog veće brzine strujanja u tom dijelu difuzora.

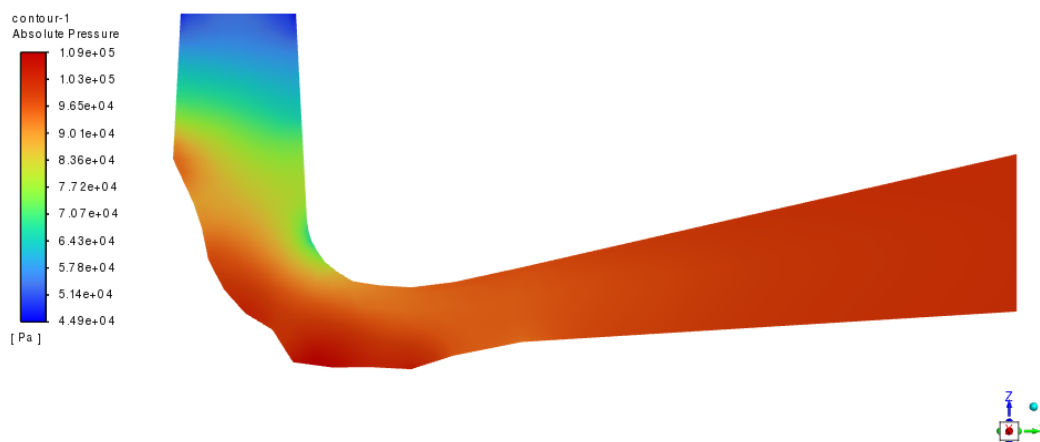
6.5 Apsolutni tlak

Anslys
2022 R2
STUDENT



Slika 6.14. Konture apsolutnog tlaka kod originalnog difuzora

Anslys
2022 R2
STUDENT



Slika 6.15. Konture apsolutnog tlaka kod optimiziranog difuzora

Iz slika 6.14. i 6.15. vidljivo je da se apsolutni tlak ponaša slično statičkom tlaku, odnosno apsolutni tlak je najmanji na ulazu u difuzor, a najveći na izlazu iz difuzora. Na izlazu iz difuzora apsolutni tlak je jednak atmosferskom tlaku te iznosi 101 325 Pa.

7 ZAKLJUČAK

Zadatak ovog završnog rada je analizirati strujanje fluida kroz difuzor vodne turbine. U prvom dijelu rada prikazan je teorijski dio pregleda vodnih turbina. Navedena je podjela na reakcijske i akcijske turbine te njihovi glavni predstavnici i njihove glavne razlike. Nakon općenitog pregleda turbina, opisan je princip rada i podjela difuzora. Hidraulički, volumetrički i mehanički gubici vodnih turbina opisani su jednadžbama. Hidraulički gubici su opširnije opisani s obzirom da gubici u difuzoru spadaju u hidrauličke gubitke. Nakon prikaza jednadžbi za gubitke u turbini, opisuje se razrada zadatka. Koracima je prikazana izrada geometrije, numeričke mreže te simulacije u programu Ansys Fluent. U rezultatima simulacije vrši se usporedba dva geometrijski različita difuzora, jedan optimiziranog, a drugi originalnog oblika. Simulacija je omogućila prikaz raspodjele tlakova i brzine strujanja pri pojedinim difuzorima. Brzina strujanja je najveća na ulaznom presjeku difuzora, a najmanja na izlaznom presjeku. Konturama i strujnicama je prikazano kretanje i turbulentno strujanje čestica fluida. Statički i dinamički tlakovi ovise o brzini strujanja pa se tako statički tlakovi povećavaju od ulaznog presjeka prema izlazu, dok se dinamički smanjuju. Apsolutni tlak je sličan statičkom te se on također povećava od ulaznog presjeka prema izlaznom gdje se izjednačuje s atmosferskim tlakom. Kod optimiziranog difuzora imamo manju brzinu, statički i apsolutni tlak, zbog geometrije difuzora. Iako se po provedenim numeričkim simulacijama može zaključiti da je optimizirana geometrija bolje rješenje, za takav konačan zaključak potrebno je provesti detaljnije simulacije strujanja. S inženjerskog stajališta vidljivo je da oblik koji nije zaglađen bi mogao biti zahtjevan za izradu, te je moguće da su dobivene uštede posljedice grešaka u numerici. Simulacijom u programu Ansys Fluent možemo vidjeti kakva geometrija difuzora nam odgovara te brzo i jednostavno prilagoditi difuzor, ukoliko su potrebne promjene, kako bi se isti poboljšao i unaprijedio. Za konačan zaključak o poboljšanom dizajnu, potrebno je napraviti kompleksnije i računalno zahtjevnije simulacije s većim brojem elemenata.

8 LITERATURA

- [1] S interneta, <https://www.iea.org/reports/hydropower-special-market-report/executive-summary>, 20. veljače 2023.
- [2] S interneta, https://hr.wikipedia.org/wiki/Vodeni%C4%8Dko_kolo, 20. veljače 2023.
- [3] S interneta, https://hr.wikipedia.org/wiki/Vodna_turbina, 20. veljače 2023.
- [4] S interneta, <https://www.statista.com/statistics/265570/top-countries-by-hydropower-consumption/>, 20. veljače 2023.
- [5] Čarija, Z.: „Vodne turbine“, radni materijal predavanja kolegija Hidraulički strojevi, Rijeka, 2019.
- [6] S interneta, <https://vodaizvorzivota.weebly.com/kru381enje-vode-u-prirodi.html>, 20. veljače 2023.
- [7] S interneta, <http://thoriumaplust.com/osnovne-vrste-vodnih-turbina-video/>, 20. veljače 2023.
- [8] Breeze, P.: „Hydropower“, Elsevier Science, Ujedinjeno Kraljevstvo, 2018.
- [9] S interneta, <https://theconstructor.org/practical-guide/kaplan-turbine-component-working/2904/>, 21. veljače 2023.
- [10] S interneta, <https://www.hep.hr/proizvodnja/hidroelektrane-1528/pp-he-sjever/he-varazdin/1532>, 21. veljače 2023.
- [11] S interneta, https://en.wikipedia.org/wiki/Screw_turbine, 21. veljače 2023.
- [12] S interneta, <https://sites.google.com/site/tehskolamojaucionica/home/obnovljivi-izvori-energije/turbine-kod-hidroelektrana>, 21. veljače 2023.
- [13] S interneta, https://hr.wikipedia.org/wiki/Peltonova_turbina, 21. veljače 2023.
- [14] S interneta, <https://savree.com/en/encyclopedia/pelton-turbine-bucket>, 21. veljače 2023.
- [15] S interneta, <https://mavel.cz/turbines/pelton/>, 21. veljače 2023.
- [16] S interneta, <https://learnmech.com/pelton-wheel-turbine/>, 21. veljače 2023.
- [17] S interneta, https://energyeducation.ca/encyclopedia/Turgo_turbine, 21. veljače 2023.
- [18] S interneta, https://hr.wikipedia.org/wiki/Turbina_s_križnim_protokom, 21. veljače 2023.

- [19] S interneta, [https://ossberger.de/en/hydropower-technology/ossbergerr-crossflow turbine/](https://ossberger.de/en/hydropower-technology/ossbergerr-crossflow_turbine/), 21. veljače 2023.
- [20] S interneta, <https://www.linquip.com/blog/what-is-tesla-turbine/>, 21. veljače 2023.
- [21] S interneta, https://hr.wikipedia.org/wiki/Jonvalova_turbina, 21. veljače 2023.
- [22] S interneta, https://www.linquip.com/blog/draft-tube/#Types_of_Draft_Tube, 23. veljače 2023.
- [23] Suravarapu, L.; Khare, R.: „Advances in Clean Energy Technologies“, Springer, Singapor, 2021.
- [24] S interneta, https://en.wikipedia.org/wiki/Draft_tube, 23. veljače 2023.
- [25] Horvat, D.: „VODNE TURBINE – knjiga 1“, Tehnička Knjiga, Zagreb, 1955.
- [26] Kranjčević, L.: „Mehanika fluida“, skripta sa kolegija Mehanika fluida, Rijeka, 2020.
- [27] S interneta, https://hr.wikipedia.org/wiki/Numeri%C4%8Dka_analiza, 25. veljače 2023.
- [28] S interneta, <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent>, 25. veljače 2023.
- [29] Lučin, I.; Sikirica, A.; Šiško Kuliš, M.; Čarija, Z.: Investigation of Efficient Optimization Approach to the Modernization of Francis Turbine Draft Tube Geometry. *Mathematics* 2022, *10*, 4050. <https://doi.org/10.3390/math10214050>

9 POPIS OZNAKA

η_h – stupanj iskoristivosti turbine, uzimajući u obzir hidrauličke gubitke

h_S – gubitak u statoru [m]

h_R – gubitak u rotoru [m]

h_D – gubitak u difuzoru [m]

h_i – gubitak na izlazu iz rotora [m]

$h_{\text{gub},i}$ – gubici trenja u spirali [m]

Q – volumni protok [m^3/s]

$A_{\text{spi},i}$ – površina ulaznog presjeka spirale [m^2]

k_i – koeficijent lokalnog otpora

k_{PL} – koeficijent lokalnog otpora privodećih lopatica

w_1 – relativna brzina na ulazu u rotor [m/s]

β_{ul} – ulazni kut lopatice [$^\circ$]

$h_{\text{gub,rot}}$ – gubici trenja u rotoru [m]

k_{rot} – koeficijent lokalnog otpora rotora

w_R – srednja relativna brzina u rotorskom kanalu [m/s]

g – ubrzanje sile teže [m^2/s]

$h_{\text{gub,odv}}$ – gubici uslijed odvajanja struje fluida [m]

α_1 – kut tangente skeletnice profila [$^\circ$]

v_2 – brzina na ulazu u difuzor [m/s]

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

p_a – atmosferski tlak [Pa]

H_S – visinska razlika između ulaza difuzora i donje vode [m]

ρ – gustoća vode [kg/m^3]

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

v_3 – brzina na izlazu u difuzor [m/s]

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

A_2 – površina ulaznog poprečnog presjeka [m²]

A_3 – površina izlaznog poprečnog presjeka [m²]

η_v – koeficijent volumetričke iskoristivosti

Q_0 – ukupna raspoloživa količina fluida [m³/s]

Q_R – radno sposobna količina fluida [m³/s]

η_m – koeficijent mehaničke iskoristivosti

P – snaga dobivena na vratilu [W]

$P_{\text{gub,ležaja}}$ – snaga u ležajevima vratila [W]

h_{lok} – lokalni gubici strujanja vode [m]

h_{duz} – duljinski gubici strujanja vode [m]

k_{lok} – koeficijent lokalnih gubitaka

λ – koeficijent hrapavosti

D – promjer cijevi [m]

L – duljina cijevi [m]

v – brzina strujanja [m/s]

\dot{V} – volumni protok [m³/s]

\dot{m} – maseni protok [kg/s]

10 POPIS SLIKA

Slika 2.1. Vodeničko kolo [2]	2
Slika 2.2. Kruženje vode u prirodi [6].....	3
Slika 2.3. Turbine prema smjeru protoka [7]	4
Slika 2.4. Dijelovi Francis-ove turbine [8].....	5
Slika 2.5. Dijelovi Kaplan-ove turbine [9]	6
Slika 2.6. HE Varaždin [10]	7
Slika 2.7. Pužna turbina [11]	7
Slika 2.8. Prikaz rada akcijske turbine [12]	8
Slika 2.9. Lopatica Pelton-ove turbine [14]	9
Slika 2.10. Horizontalna izvedba s 2 privoda [15].....	10
Slika 2.11. Vertikalna izvedba s 4 privoda [16].....	10
Slika 2.12. Turgo turbina s bočnim privodom vode [5]	11
Slika 2.13. Ossberger-ova (crossflow) turbina [19]	12
Slika 2.14. Teslina turbina sa prednje (front) i bočne (side) strane [20].....	12
Slika 2.15. Rotor Jonval-ove turbine [21]	13
Slika 3.1. Vrste difuzora [23]	15
Slika 3.2. Prikaz kuta kod konusnog difuzora [24]	15
Slika 4.1. Ulazni i izlazni presjeci difuzora [5]	20
Slika 5.1. Difuzor sa karakterističnim presjecima za optimizaciju [29]	25
Slika 5.2. Geometrija difuzora u izometriji.....	26
Slika 5.3. Prikaz numeričke mreže u nacrtu	27
Slika 5.4. Inlet	27
Slika 5.5. Outlet.....	28
Slika 5.6. Inflacija na ulaznom (lijevo) i izlaznom (desno) presjeku.....	28
Slika 5.7. Fluent Launcher	29
Slika 5.8. Odabir modela strujanja	30
Slika 5.9. Inicijalizacija od ulaznog presjeka	31
Slika 6.1. Originalan difuzor	32
Slika 6.2. Graf konvergencije originalnog difuzora	33
Slika 6.3. Graf konvergencije optimiziranog difuzora	33
Slika 6.4. Konture brzine strujanja kod originalnog difuzora	34
Slika 6.5. Konture brzine strujanja kod optimiziranog difuzora	34

Slika 6.6. Konture brzina na različitim presjecima kod originalnog difuzora	35
Slika 6.7. Konture brzina na različitim presjecima kod optimiziranog difuzora	35
Slika 6.8. Strujnice brzine kod originalnog difuzora.....	36
Slika 6.9. Strujnice brzine kod optimiziranog difuzora	37
Slika 6.10. Konture statičkog tlaka kod originalnog difuzora.....	38
Slika 6.11. Konture statičkog tlaka kod optimiziranog difuzora.....	38
Slika 6.12. Konture dinamičkog tlaka kod originalnog difuzora	39
Slika 6.13. Konture dinamičkog tlaka kod optimiziranog difuzora	39
Slika 6.14. Konture apsolutnog tlaka kod originalnog difuzora.....	40
Slika 6.15. Konture apsolutnog tlaka kod optimiziranog difuzora	40

11 SAŽETAK

U ovome radu napravljen je pregled vodnih turbina te se opisuje njihova podjela. Također se opisuje svrha i podjela difuzora te su navedene vrste gubitaka u vodnoj turbini, zajedno sa glavnim jednažbama. U sklopu rada izrađene su numeričke simulacije strujanja fluida kroz difuzor vodne turbine u programu Ansys Fluent, na dva geometrijski različita difuzora. Rezultati promjena brzina strujanja i tlakova prikazani su grafički te se uspoređuju i analiziraju razlike.

Ključne riječi: vodna turbina, difuzor, gubici u turbini, simulacija strujanja fluida, Ansys Fluent

12 ABSTRACT

In this paper an examination of water turbines and their division is described. The purpose and division of the draft tube is also described, as well as the types of losses in the water turbine, with their main equations. As part of the paper, numerical simulations of fluid flow through a water turbine draft tube were made in the Ansys Fluent program, for two geometrically different draft tubes. The results of the change in flow rate and pressure are shown graphically and the differences are compared and analyzed.

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