

Problem kavitacije kod vodnih turbina

Braut, Luka

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

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:190:472216>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-13**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Prijediplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

PROBLEM KAVITACIJE KOD VODNIH TURBINA

Rijeka, rujan 2024.

Luka Braut

0069084546

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Prijediplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

PROBLEM KAVITACIJE KOD VODNIH TURBINA

Mentor: Prof. dr. sc. Zoran Čarija

Komentor: v. asist. dr. sc. Ivana Lučin

Rijeka, rujan 2024.

Luka Braut

0069084546

Rijeka, 20.03.2024.

Zavod: Zavod za mehaniku fluida i računalno inženjerstvo
Predmet: Hidraulički strojevi

ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Luka Braut (0069084546)**
Studij: Sveučilišni prijediplomski studij strojarstva (1010)

Zadatak: **Problem kavitacije kod vodnih turbine / Cavitation problem in water turbines**

Opis zadatka:

Potrebno je objasniti problem nastanka kavitacije kod vodnih turbina i negativne posljedice koje nastaju. Potrebno je napraviti pregled literature o mogućim rješenjima za smanjenje ili otklanjanje pojave kavitacije kod vodnih turbina. U okviru završnog rada potrebno je izraditi numeričku analizu strujanja kroz odabranu geometriju difuzora vodne turbine. Geometriju je nužno adekvatno umrežiti poštujući općeprihvaćena pravila. Potrebno je prikazati turbulentni tok nekompresibilnog fluida.

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

Zadatak uručen pristupniku: 20.03.2024.

Mentor:
prof. dr. sc. Zoran Čarija

Komentor:
dr. sc. Ivana Lučin

Predsjednik povjerenstva za
završni ispit:
izv. prof. dr. sc. Samir Žic

Izjava

Izjavljujem da sam ovaj rad “Problem kavitacije kod vodnih turbina” izradio samostalno koristeći navedenu literaturu uz znanje stečeno tijekom prijediplomskog studija i stručno vodstvo mentora i komentora.

Rijeka, rujan 2024.

Luka Braut

Zahvala

Zahvalio bi se prof.dr.sc. Zoranu Čariji na pruženoj prilici za izradu završnog rada, te zahvaljujem na svim savjetima i pomoći u izradi rada.

Nadalje, iznimno sam zahvalan asist.dr.sc Ivani Lučin koja je uvijek bila dostupna i spremna odgovoriti na sva moja pitanja, te svim stručnim savjetima pri izradi ovog završnog rada.

Na kraju, želio bih se iskreno zahvaliti svojim roditeljima na neizmjerne podršci i strpljenju koje su mi pružali tijekom cijelog studiranja.

Sadržaj

| | |
|---|----|
| 1. UVOD..... | 1 |
| 2. KAVITACIJA | 2 |
| 2.1 Definicija kavitacije | 2 |
| 2.2 Vrste kavitacije..... | 3 |
| 2.3 Negativne posljedice kavitacije..... | 6 |
| 3. KAVITACIJA KOD POJEDINOG TIPRA TURBINE..... | 8 |
| 3.1 Francis-ova turbina..... | 8 |
| 3.2 Pelton-ova turbina | 10 |
| 3.3 Kaplan-ova turbina..... | 11 |
| 4. TEHNIKE DETEKCIJE KAVITACIJE | 13 |
| 4.1 Mjerenje tlakova..... | 13 |
| 4.2 Vizualne metode..... | 14 |
| 4.3 Mjerenje vibracija | 15 |
| 4.4 Mjerenje kavitacijske buke..... | 16 |
| 4.5 CFD analiza..... | 16 |
| 5. METODE SMANJENJA POJAVE KAVITACIJE KOD VODNIH TURBINA | 17 |
| 5.1 Metoda upuhivanja zraka..... | 17 |
| 5.2 Poboľšanje konstrukcije prostora turbine i profila lopatica..... | 18 |
| 5.3 Instalacija turbine na odgovarajućoj visini iznad razine odvodnog kanala..... | 18 |
| 5.4 Sprječavanje kavitacije korištenjem tehnika otpornih na eroziju..... | 19 |
| 6. PROBLEM KAVITACIJE U DIFUZORU TURBINE..... | 21 |
| 6.1 Princip rada difuzora | 21 |
| 6.2 Kavitacija u difuzoru i metode smanjivanja kavitacije | 22 |
| 7. NUMERIČKA ANALIZA STRUJANJA KROZ DIFUZOR..... | 25 |

| | | |
|-----|--|----|
| 7.1 | Izrada numeričke mreže | 25 |
| 7.2 | Izrada simulacije | 30 |
| 8. | REZULTATI | 34 |
| 8.1 | Graf konvergencije | 34 |
| 8.2 | Statički, dinamički i apsolutni tlak | 34 |
| 8.3 | Brzine strujanja fluida | 39 |
| 9. | ZAKLJUČAK | 43 |
| 10. | POPIS SLIKA | 44 |
| 11. | LITERATURA | 46 |
| 12. | SAŽETAK | 47 |
| 13. | ABSTRACT | 48 |

1. UVOD

Hidroenergija predstavlja jedan od najvažnijih obnovljivih izvora energije, koja se koristi za proizvodnju električne energije pomoću vodnih resursa. Sektor hidroenergetike nadmašuje ostale sektore obnovljive energije zbog visoke učinkovitosti, sposobnosti kontinuirane proizvodnje i niskih troškova proizvodnje. Hidroturbine, kao ključne komponente hidroenergetskih postrojenja, pretvaraju kinetičku energiju vode u mehaničku energiju koja se zatim koristi za generiranje električne energije.

Kavitacija je fenomen koji se često javlja u hidrauličkim postrojenjima, posebice u vodnim turbinama. Pojava kavitacije uključuje formiranje i imploziju mjehurića pare unutar fluida. Uzrok pojave kavitacije je pad tlaka strujnog fluida na tlak isparavanja fluida. Vrlo je bitno razumijevanje ovog fenomena jer ima brojne negativne posljedice. Kavitacija dovodi do vibracija, buke i oštećenja dijelova turbine, što sve zajedno smanjuje učinkovitost hidroturbinskog postrojenja.

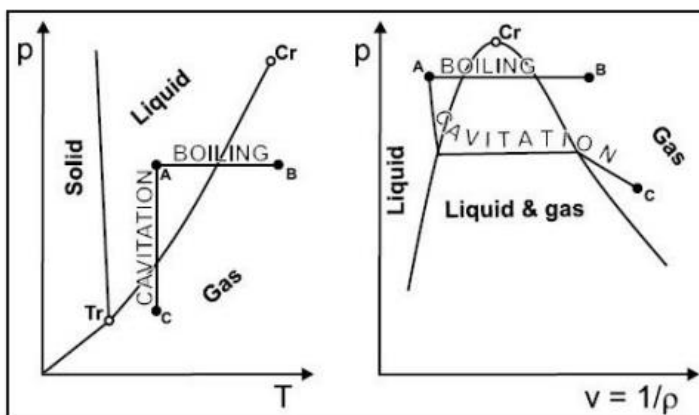
Cilj ovog završnog rada je definirati problem nastanka kavitacije u vodnim turbinama, negativne posljedice uzrokovane kavitacijom i metode smanjivanja pojave kavitacije. Pored analize teorijskog aspekta pojave kavitacije, obraditi će se i analiza strujanja fluida kroz odabranu geometriju difuzora vodne turbine.

U drugom poglavlju obrađen je sam nastanak kavitacije kod vodnih turbina te su opisane vrste kavitacije koje se mogu pojaviti. Treće poglavlje je sačinjeno od pregleda nastanka kavitacije kod pojedinačnog tipa turbina, u ovom slučaju kod Francis-ove, Kaplan-ove i Pelton-ove turbine. U četvrtom poglavlju je dan opis tehnika detekcije kavitacije, koji je važan faktor pri pravovremenom uočavanju pojave kavitacije. Nadalje, u petom poglavlju je napravljen pregled literature vezan za smanjivanje kavitacije kod vodnih turbina, te je svaka metoda detaljnije opisana. U šestom poglavlju definirana je funkcija difuzora kao sastavnog dijela reakcijskih turbina, te je opisan problem kavitacije u difuzoru i ponuđena su rješenja za smanjenje kavitacije. Zatim, sedmo poglavlje opisuje proces izrade numeričke mreže i pripremu geometrije difuzora za numeričku analizu strujanja fluida kroz difuzor. U ovom radu koristiti će se programski paket Ansys Fluent koji je jedan od najpopularnijih softverskih paketa pri izradi raznih simulacija u svrhe promatranja i analiziranja fluida. Na kraju, u završnom poglavlju predstavljeni su i analizirani rezultati dobiveni računalnim simulacijama.

2. KAVITACIJA

2.1 Definicija kavitacije

Kavitacija dolazi od engleske riječi “Cavity” što u prijevodu znači šupljina. Kavitacijom se upravo smatra pojava diskontinuiteta ili “šupljina” u obliku mjehurića pare unutar struje tekućine u hidrauličkim turbinama [1]. Kavitacija je usko povezana s hidrauličkim dizajnom stroja, oblikom rotora i odabirom materijala, kao i načinom njegovog rada. Važan faktor u ovom fenomenu je i postotak otopljenih plinova. Na pojavu kavitacije utječu visoke temperature, niska viskoznost, te nečistoće poput čestica i plinova. Također, nepravilna geodetska pozicija stroja može imati značajan utjecaj na ovaj fenomen. Kada u određenim uvjetima strujanja vode tlak padne na tlak pare (tlak isparavanja), dolazi do lokalnog isparavanja, odnosno stvaranja mjehurića pare. Struja vode nosi te mjehuriće, koji naglo kolabiraju (implodiraju) kada dođu u područje većeg tlaka. Ovaj proces izaziva naglu promjenu gustoće i ekstremnu promjenu tlaka. Ova pojava se naziva kavitacijom [21].



Slika 2.1 Pojava kavitacije i isparavanje [2]

Na slici 2.1 točka T_r predstavlja trojnu točku dok C_r predstavlja kritično stanje vode. Početno stanje označeno je sa točkom A u području gdje se radna tvar nalazi u tekućem stanju.

Proces isparavanja se postiže na dva načina, kada pri stalnom tlaku povećava temperatura te dođe do pomaka prema točki B ili snižavanjem tlaka čime se ostvaruje pomak prema točki C odnosno pojava kavitacije. Naknadna transformacija ostvaruje se povećanjem tlaka čime se radna tvar vraća u tekuću fazu odnosno u početno stanje točke A. Ovim postupkom se zatvara “ciklus” kavitacije, pošto kavitacija opisuje prijelaz iz plinovite u tekuću fazu i obrnuto. Završni stadij mjehurića pare poznata je kao implozija mjehura. Kada mjehur pare kolabira, praznina se trenutno ispuni tekućinom sa svih strana. Tada nastaje snažan udarni val koji može uzrokovati oštećenje materijala ako se dogodi u blizini čvrstih površina [2].

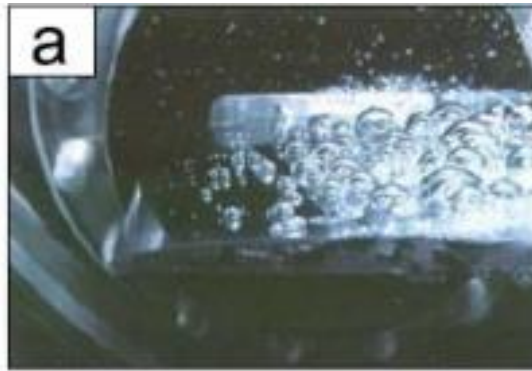
2.2 Vrste kavitacije

Nekoliko je karakterističnih tipova kavitacije kod hidrauličkih strojeva, podjela prema lokaciji je sljedeća [2]:

- Profilna kavitacija, nastaje kada fluid struji preko površine lopatice pod određenim kutom, pri čemu je tlak s jedne strane profila viši, a s druge strane niži od okolnog tlaka,
- Kavitacija u zazoru, javlja se zbog prevelikog zazora između rotora i kućišta rotora. Zbog velikog zazora između lopatice rotora i kućišta rotora, fluid prestrujava s pretlačne na potlačnu stranu stoga kavitacija se događa zbog uznemiravanja struje fluida,
- Središnja kavitacija obično se javlja kada turbina radi unutar svog predviđenog radnog režima.

Kavitacija, pogotovo profilna kavitacija može se razviti i pojaviti u različitim oblicima poput [1]:

- a) Kavitacija putujućih mjehurića događa se pri velikim opterećenjima kada razlika u tlaku na lopatici postane dovoljno velika i lokalni tlak na strani usisavanja padne ispod tlaka pare. Ovi mjehurići se stvaraju u fluidu i kreću zajedno sa strujom fluida. Kod ovog tipa kavitacije mjehurići mogu narasti do makroskopske veličine, s promjerom od nekoliko milimetara. Najčešće nastaje pri nastrujavanju fluida sa malim upadnim kutem na hidro-profile.



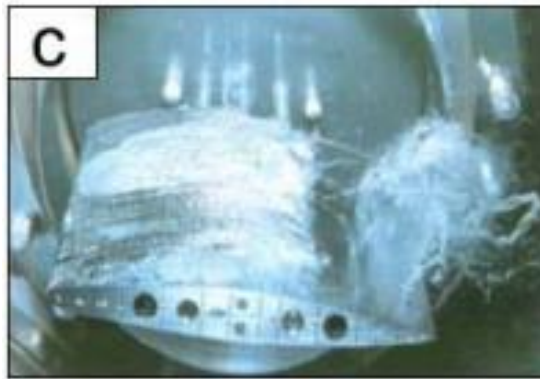
Slika 2.2 Prikaz kavitacije putujućih mjehura [1]

- b) Kavitacija u obliku zavjese je stacionarna u kvazi-stacionarnom smislu. Granična površina između tekuće i plinovite faze može biti glatka i prozirna ili nepravilna poput površine koja je u stanju intenzivnog isparavanja. Ta granica postaje valovita, a na kraju nestaje (mjehurići pare prelaze natrag u tekućinu) u zoni gdje se šupljine zatvaraju.



Slika 2.3 Prikaz kavitacije u obliku zavjese [1]

- c) Kavitacija u obliku oblaka nastaje zbog vrtložnosti uvedene u polje strujanja. Ova vrsta kavitacije uzrokuje najviše inženjerskih problema, uključujući vibracije, buku i eroziju materijala. Periodično stvaranje oblaka mjehurića pare rezultat je nestacionarnog strujanja.



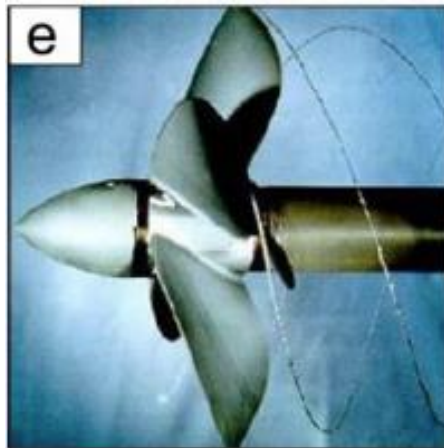
Slika 2.4 Kavitacija u obliku oblaka [1]

- d) Superkavitacija događa se kada zavjesa mjehurića pare postane dovoljno velika da potpuno obuhvati čvrsto tijelo oko kojeg teče fluid. U ovom slučaju, postoji izrazito oštra granica između tekuće i plinovite faze [2]. Smatra se da superkavitacija posjeduje mogućnosti koje bi se mogle iskoristiti u pomorskom prometu, posebice kod pogona podmornica, zbog toga što se superkavitacijom smanjuje otpor fluida gibanju stoga veliki objekti bi u kratkom vremenu prelazili velike udaljenosti [4].



Slika 2.5 Prikaz superkavitacije [1]

- e) Vrtložna kavitacija obično se javlja zbog visokih smičnih naprezanja u promatranom području. Područja strujanja s koncentriranom vrtložnošću mogu razviti kavitaciju u svojim središnjim jezgrama zbog niskih tlakova koje stvaraju. Kada su vrhovi tih vrtloga ispunjenih parom u dodiru s čvrstom površinom, postaju potencijalno erozivni jer se konačni sudar kavitacijskih mjehurića događa na toj površini. Najčešće nastaje na krajevima rotirajućih lopatica ili ispod glavčine vodne turbine, ali i u difuzoru turbine kada turbine rade s djelomičnim opterećenjem.



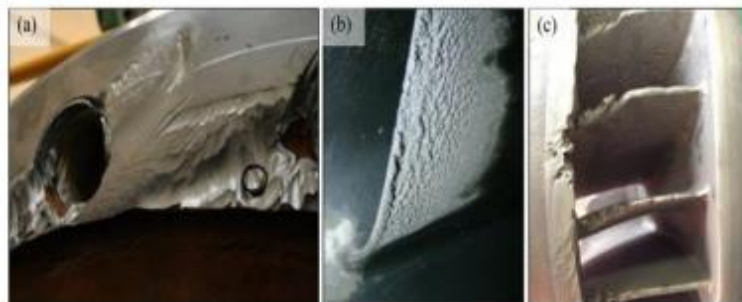
Slika 2.6 Primjer vrtložne kavitacije [1]

2.3 Negativne posljedice kavitacije

Učinci kavitacije, kao nepoželjnog hidrodinamičkog procesa, mogu se podijeliti na fizičko-kemijske i mehaničke. Ovi učinci postaju vidljivi zbog promjena u kavitacijskim mjehurićima, od njihovog nastanka pa sve do implozije [3]. Prva kategorija uključuje promjene termodinamičkih svojstava tekućine, što se odnosi na promjene tlaka i temperature. Kavitacija može pokrenuti sonokemijske procese, gdje ultrazvučni valovi uzrokuju kemijske reakcije. Specifičan fenomen koji se javlja pri kavitaciji je sonoluminiscencija, pri kojem kavitacijski mjehurići emitiraju svjetlost odnosno bljeskove kada implodiraju. Proces kavitacije može izazvati kavitacijsku koroziju, što dovodi do ubrzane korozije materijala zbog oštećenja uzrokovanih kavitacijskim mjehurićima.

S druge strane, mehanički efekti kavitacije uključuju kavitacijski šum, što je zvuk visokog intenziteta. Formiranje parnih mjehurića može prigušiti strujanje tekućine, ometajući normalan protok. Također, kavitacija može izazvati jake vibracije u zoni kavitacije stroja. Utjecaj na buku i vibracije ima ranije spomenuta implozija mjehurića koja generira udarne valove koji proizvode buku i vibracije u okolnom materijalu. Nadalje, kod kavitacije je često turbulentno strujanje fluida što dovodi do dodatnih dinamičkih sila koje uzrokuju vibracije te prilikom kolabiranja mjehurića dolazi do mehaničkog udara gdje se oslobađa velika količina energije što prouzrokuje vibracije kod hidrauličkog stroja. Zbog toga je moguće detektirati kavitaciju putem mjerenja buke, no treba uzeti u obzir da vibracije i buka u postrojenju mogu potjecati i iz drugih izvora koji nisu povezani s kavitacijom [3].

Nagli pad snage turbine odnosno i same efikasnosti turbine dolazi i zbog prisustva mješovitog fluida odnosno smjese vode i pare što uzrokuje pad gustoće fluida [1]. Ranije spomenuti faktori koji utječu na buku i vibracije odnose se i na smanjenje učinkovitosti hidrauličkih strojeva, no fenomen kavitacijske erozije ima značajan utjecaj. Kavitacijska erozija ili u svijetu poznata kao “Pitting” je oštećenje materijala stroja prilikom implozije mjehurića odnosno dolazi do uništavanja površine lopatica rotora te se takva oštećenja šire zbog kontinuirane kavitacije.



Slika 2.7 Kavitacijska erozija Francis turbine [3]

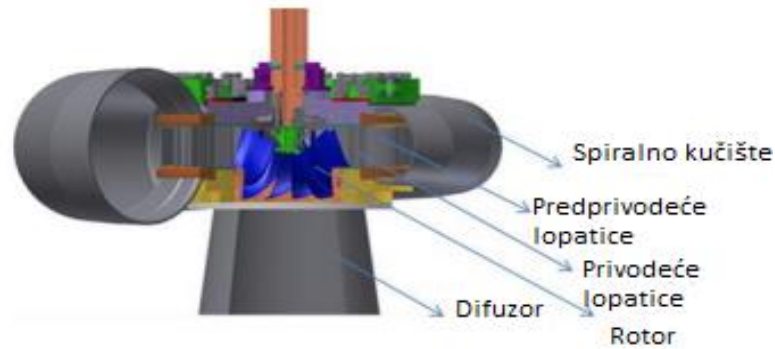
Na slici 2.7 su prikazani različiti oblici oštećenja kavitacijske erozije, konkretno ovdje kod Francis-ove turbine, dakle: a) na glavčini, b) površinska erozija na lopaticama rotora i c) kavitacija ulaznog brida lopatica [3].

3. KAVITACIJA KOD POJEDINIH TIPOVA TURBINA

Kavitacija igra važnu ulogu u reakcijskim vodenim turbinama kao što su Francis, Kaplan i propelernim turbinama, ali i kod akcijskih poput Pelton-ove turbine. Glavna razlika između reakcijskih i akcijskih turbina zasniva se na činjenici da se zakretni moment na rotoru kod akcijske turbine ostvaruje isključivo samo iz sile koja se stvara promjenom količine gibanja fluida, dok se kod reakcijske turbine ostvaruje kombinacijom sila iz promjene količine gibanja fluida i sile koja nastaje zbog razlike u tlaku unutar sustava.

3.1 Francis-ova turbina

Francis-ova turbina ima široku primjenu u hidroenergetici zbog svojih karakteristika koje uključuju mogućnost rada pri različitim uvjetima rada. Ovaj tip turbine predstavlja kombinaciju impulsne i reakcijske turbine pošto je ovo turbina sa mješovitim tokom vode, voda teče radijalno prema lopaticama rotora i izlazi aksijalno. Ove turbine se uglavnom koriste u srednjim ili velikim hidroelektranama, te primarna funkcija je proizvodnja električne energije uz pomoć generatora. Francis-ova turbina posebno je učinkovita kod padova vode, gdje visina se nalazi u rasponu od 20 do čak 700 metara. Glavne komponente kod ovog tipa turbina su: spiralno kućište, predprivodeće lopatice, privodeće lopatice, rotor i difuzor. Spiralno kućište ima ulogu da raspodjeli tok fluida radijalno prema predprivodećim lopaticama, koje su odgovorne za pravilno nastrojavanje fluida na privodeće lopatice. Nakon, što fluid prođe kroz privodeće lopatice, udara u lopatice rotora, stvarajući zakretni moment koji rotira osovinu generatora turbine, čime se proizvodi električna energija. Difuzor povezuje izlaz rotora s razinom donje vode.



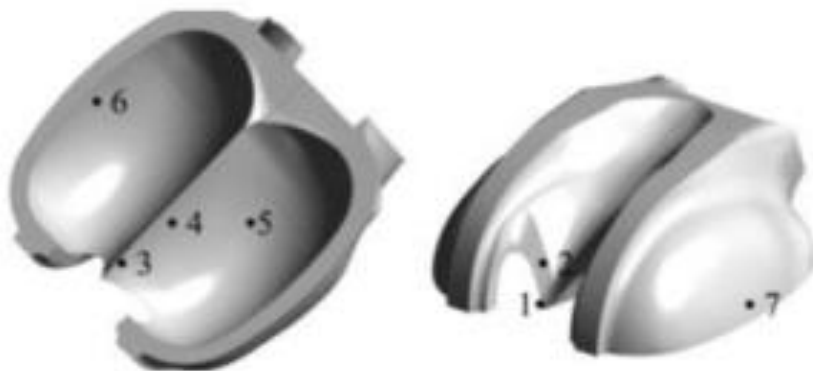
Slika 3.1 Prikaz Francis-turbine [8]

U nastavku će se opisati ukratko nekoliko najčešćih vrsta kavitacije koje se javljaju kod Francis-ove turbine [9]:

- a) Kavitacija na izlaznom rubu: kod ove vrste kavitacije, ako se kavitacija javlja samo na izlaznom rubu lopatice, kavitacijski mjehuri se urušavaju u ispusnoj cijevi, što ne uzrokuje ozbiljna oštećenja. Međutim, ako područje kavitacije dopre do uzvodnog dijela lopatice, može doći do ozbiljnih oštećenja unutar turbine.
- b) Vrtložna kavitacija u difuzoru turbine: Ova vrsta kavitacije javlja se na izlazu iz rotora i ulazu u difuzor. Njezin učinak ovisi o obodnoj komponenti brzine protoka koja izlazi iz rotora. Ova vrsta kavitacije uzrokuje pulsacije tlaka i oscilacije snage.
- c) Kavitacija na prednjem rubu lopatica: Pri radu s visokim tlakom, kavitacija se javlja na usisnoj strani lopatice blizu ulaznog ruba. Budući da se događa na ulazu u rotor, uzrokuje ozbiljna oštećenja, vibracije i fluktuacije tlaka.
- d) Vrtložna kavitacija među lopaticama: Nastaje zbog odvajanja toka te se stvaraju sekundarni vrtlozi između lopatica. Ako ti vrtlozi dodiruju rubove lopatica, ova vrsta kavitacije može biti štetna; u suprotnom, vrtlozi među lopaticama ne uzrokuju vibracije ili oštećenja. Ukoliko u radnom rasponu s visokim tlakom vrtlozi kavitacije postanu nestabilni ovaj tip prelazi u štetni tip kavitacije.
- e) Kavitacija putujućih mjehura: Pri niskom tlaku dolazi do odvajanja toka zbog ulaznog kuta protoka. To uzrokuje snažne vibracije i oštećenja.

3.2 Pelton-ova turbina

Peltonove turbine se smatraju jednim od najučinkovitijih turbina s impulsnim odnosno akcijskim djelovanjem, koje iskorištavaju energiju vode pretvarajući raspoloživi pad u kinetičku energiju. Sa konstrukcijske strane Pelton-ove turbine su najjednostavnije vodne turbine jer se samo sastoje od privoda vode, sapnica i rotora. Kada mlaz vode velike brzine izlazi iz sapnice, udara u lopatice na rotoru, stvarajući zakretni moment koji pokreće turbinu. Rotirajuća osovina zatim pokreće generator i proizvodi električnu energiju. Ovaj tip turbina je najprikladniji kod velikih padova i malih protoka vode.



Slika 3.2 Lokacije kavitacijske erozije u Pelton-ovoj turbini [10]

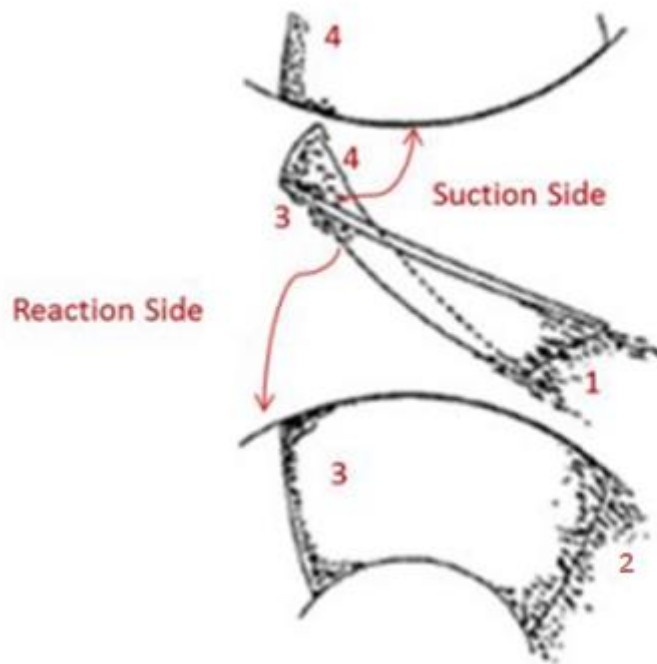
Osim erozije uslijed kavitacije, Pelton-ove turbine su zbog posebnog dizajna lopatica također podložne mehaničkoj eroziji. Visoke brzine na površini lopatice uzrokuju eroziju uslijed prodora mulja u samu turbinu. Nestabilan protok između mlaza i lopatice može izazvati agresivnu kavitaciju, dok nepravilni dizajn lopatice također može biti uzrok kavitacije. Zato su provedena brojna numerička i eksperimentalna istraživanja o dizajnu Pelton-ovih lopatica otpornih na kavitaciju. Rossetti i suradnici [11] klasificiraju kavitaciju u Pelton-ovim lopaticama u sedam zona koje su vidljive na slici 3.2. Interakcija lopatice i mlaza uzrokuje oštećenja u zonama 1 i 2, dok nepravilnosti površine uzrokuju kavitaciju u zonama 3 i 4 što uzrokuje separaciju strujanja fluida

od stijenki lopatica i kavitaciju. Kavitacija u zoni 5 nastaje uslijed erozije od kiše i kavitacije. Zbog nepravilnog kuta ispuštanja lopatice, kavitacija u zonama 6 i 7.

3.3 Kaplan-ova turbina

Kaplan-ova turbina spada u red reakcijskih turbina. Za razliku od lopatica Francis-ove turbine, lopatice rotora Kaplan-ove turbine mogu biti pomične. Kod ovakvog tip turbina postoje predprivodeće, privodeće te rotorske lopatice koje mogu biti fiksirane za rotor ili pomične u odnosu na osovinu stroja. Kada se rotiraju oko svojih osi, omogućavaju fino podešavanje opstrujavanja profila lopatica, osiguravajući visoku učinkovitost turbine. Kaplan-ove turbine se uglavnom primjenjuju u ravninskim područjima na rijekama gdje je osiguran cjelogodišnji visoki protok vode te izgradnjom umjetnih brana osigurava se potrebnii pad. Korisni pad za ovaj tip turbina može biti čak od samo nekoliko metara pa sve do 70 metara.

Kavitacija kod Kaplan-ove turbine, što je ujedno i propelerna turbina, javlja se u obliku kavitacije u zazoru. Ovaj tip kavitacije je najčešći tip te nastaje zbog razmaka između lopatica rotora i samog kućišta rotora. Pojavljuje se u dva oblika. Prvi oblik je kavitacija u zazoru koja se javlja na vrhu lopatice. Brzine u zazoru naglo rastu, dok se tlak smanjuje ispod razine tlaka pare, što dovodi do pojave kavitacije na vrhu zazora. Drugi oblik, je kavitacija vršnog vrtloga. Kada vršni tok napusti zazor, dolazi do mlaznog toka, a kada taj mlaz napusti usisnu stranu vrha lopatice rotora, stvara se vršni vrtlog. Zazor vrha i kavitacija vršnog vrtloga nemaju utjecaj na faktor kavitacije i ne smanjuju učinkovitost. S druge strane, kavitacija glavčine i kavitacija na prednjem rubu mogu biti opasne za Kaplan-ove turbine, što dovodi do smanjenja učinkovitosti [12].



Slika 3.3 Područja formacije kavitacije kod propelernih turbina [13]

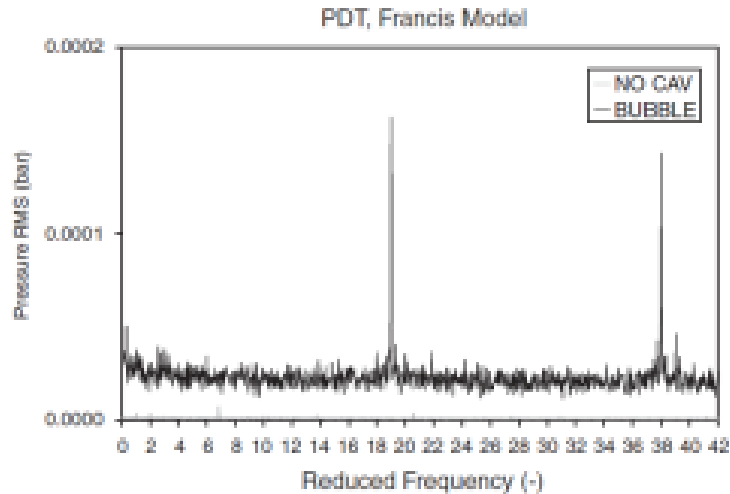
Na slici 3.3 su prikazane četiri glavne vrste kavitacije koje se javljaju kod propelernih turbina. U operativnom rasponu 1, kavitacija se pojavljuje na usisnoj strani lopatice pri visokim vrijednostima protoka. U rasponu 2, pojavljuje se vrtložni tok u difuzoru iz istih razloga kao kod Francisove turbine. U operativnom rasponu 3, kavitacija se javlja na prednjem rubu lopatice. U operativnom rasponu 4, za razliku od raspona 3, kavitacija se pojavljuje na tlačnoj strani lopatice. Kavitacija trećeg i četvrtog tipa ne javlja se ako je lopatica pravilno dizajnirana. Pri djelomičnom radu, komponenta obodne brzine smanjuje se zbog prilagodbe kuta lopatice, pa se vrtložni tok u difuzoru (raspon 2) ne pojavljuje [9].

4. TEHNIKE DETEKCIJE KAVITACIJE

Kavitacija je neželjena pojava kod hidrauličkih strojeva koja se može predvidjeti i raznim metodama smanjiti, ali i ne u potpunosti izbjeći. Najprije treba pronaći adekvatan pristup odnosno metodu detekcije kavitacije. Metode detektiranja kavitacije u realnim postrojenjima su bazirane na mjerenjima i analizi zaprimljenih signala. Ovo je vrlo složen proces pošto se kavitacija ovisno o obliku turbine i uvjetima rada uvijek pojavljuje na drugim mjestima i u drugim oblicima. Nadalje, obraditi će se sljedeće metode detekcije u nastavku, a to su: vizualne metode, akustične metode, mjerenje tlakova, vibracijske metode, ultrazvučne metode i CFD (Computational Fluid Dynamics) analize [3].

4.1 Mjerenje tlakova

Mjerenje tlakova je uobičajena metoda za određivanje kavitacije na hidrauličkim strojevima i često se kombinira s mjerenjem vibracija kako bi se postigli što precizniji rezultati o nastanku i učinku kavitacijskog procesa. Kada kaverne ili mjehurići dospiju u područje visokog tlaka, dolazi do njihovog kolapsa, što izaziva vibracije i pulsacije tlaka [14]. Primjer ovakvih mjerenja izveden je na Francis-ovoj turbini u radu kojeg su Escaler i suradnici [7] objavili, gdje se kavitacija detektirala mjerenjem tlakova s amplitudom demodulacije.

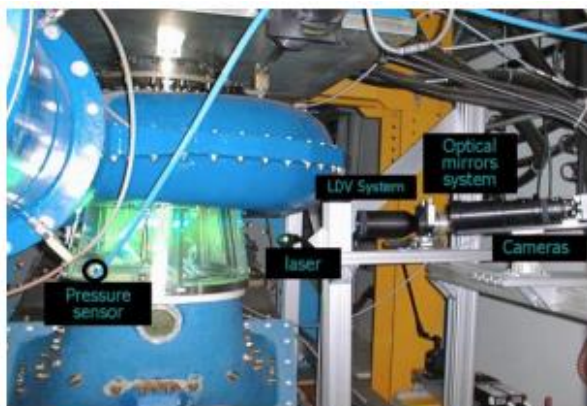


Slika 4.1 Mjerenje vršnih vrijednosti tlaka [8]

Na slici 4.1 je prikaz podataka odnosno pulsiranje tlaka u odnosu na frekvenciju za mjehuričasti tip kavitacije i strujanje bez kavitacije. Vidi se da, kad god su valovi tlaka stvoreni zbog kavitacije, dobivaju se visoki skokovi u frekvencijskom intervalu [8].

4.2 Vizualne metode

Posljednjih desetak godina vizualna metoda ispitivanja postala je izuzetno popularna, naročito u modelskim ispitivanjima hidrauličkih strojeva. Postoji više vizualnih metoda, od osnovnog vizualnog pregleda dijelova turbine pa sve do stroboskopa i superbrzih kamera koje se postavljaju uz prozirne prozorčice od pleksiglasa te tako sačinjavaju učinkovitu metodu detekcije kavitacije.



Slika 4.2 Prikaz modela Francis-turbine gdje difuzor ima prozor od pleksiglasa radi promatranja zbivanja u turbini [15]

Ranije navedene superbrze kamere spadaju u naprednu tehniku, koja se oslanja na visokobrzinske kamere za praćenje i snimanje razvoja mjehurića kavitacije u stvarnom vremenu. Ove snimke omogućuju detaljnu analizu dinamike kavitacije, pružajući važne informacije o njenom nastanku i ponašanju unutar fluida.

Laserska Dopplerova velocimetrija (LDV) koristi lasersku tehnologiju za mjerenje brzine čestica unutar fluida, omogućujući preciznu detekciju i vizualizaciju turbulentnih zona koje su često povezane s pojavom kavitacije. Slično tome, metoda Particle Image Velocimetry (PIV) koristi laserski snop za osvjetljavanje čestica u fluidu, čime omogućuje vizualizaciju polja brzine i identifikaciju područja s povećanim rizikom od kavitacije. Također, ultrazvučne metode koriste visokofrekventne zvučne valove za stvaranje slikovnog prikaza unutarnjih tokova fluida, pružajući neinvazivnu analizu i vizualizaciju kavitacije u različitim vrstama fluida. Sve ove metode doprinose boljem razumijevanju i detekciji kavitacije analizom turbulentnih struktura i polja brzina unutar fluida.

4.3 Mjerenje vibracija

Kavitacijski vrtlozi i nestabilne šupljine s velikim oscilirajućim volumenom ometaju glavno strujanje i uzrokuju snažna pulsiranja tlaka unutar hidrauličkog sustava. Ove niskofrekventne fluktuacije mogu se detektirati pomoću pretvarača tlaka postavljenih na zid

difuzora. Ako je fluktuacija dovoljno intenzivna, može se otkriti i kroz strukturne vibracije. U tom slučaju, postupak uključuje analizu frekvencijskog sadržaja signala tlaka i vibracija u niskom frekvencijskom području. Glavni nedostatak ove metode jest što signali mogu biti onečišćeni bukom i vibracijama koje dolaze iz drugih izvora, a ne promatranog područja. Zato je od velike važnosti izabrati pravilan senzor i mjerni položaj na stroju kako bi se olakšala detekcija kavitacije [16].

4.4 Mjerenje kavitacijske buke

Proučavanje vibracija, akustičke emisije i dinamičkog tlaka u visokofrekventnom rasponu je poznata metoda za detekciju kavitacije. Usporedbom amplituda određenih frekvencija za različite radne uvjete, koristeći spektar vremenskih signala, može se identificirati kavitacija. Nagli i ujednačeni porast frekvencija u usporedbi s normalnim stanjem bez kavitacije ukazuje na njezinu prisutnost. Senzori za akustičku emisiju omogućuju analizu viših frekvencija koje akcelerometri ne mogu dosegnuti. Međutim, informacije ponekad nisu pouzdane jer signali mogu dolaziti iz drugih dijelova sustava ili okoline. Zbog toga je potrebno primijeniti tehniku demodulacije amplitude kako bi se poboljšala točnost dijagnostike.

4.5 CFD analiza

Računalna dinamika fluida (CFD) primjenjuje numeričku analizu i podatkovne strukture za proučavanje i rješavanje problema povezanih s protokom tekućina. Računalna dinamika fluida koristi računala za izvođenje potrebnih izračuna kako bi se simulirao protok fluida u slobodnim strujanjima i interakcija fluida (fluida i plinova) s površinama definiranim rubnim uvjetima. Posljednjih desetak godina CFD se intenzivno koristi za predviđanje fenomena kavitacije u hidrauličkim strojevima. Upotrebom visokobrzinskih superračunala moguće je postići vrlo precizna rješenja, što je često potrebno za rješavanje najzahtjevnijih i najsloženijih problema. Numeričko modeliranje omogućuje kvalitetno predviđanje potencijalne kavitacijske erozije na materijalima [3].

5. METODE SMANJENJA POJAVE KAVITACIJE KOD VODNIH TURBINA

Turbina se može teoretski konstruirati kako bi se spriječila kavitacija, no to je u praksi nemoguće jer bi to zahtijevalo idealne uvjete rada, a u stvarnim postrojenjima takvi uvjeti nisu ostvarivi. Uvjeti u postrojenju utječu na tlak i distribuciju brzina što može uzrokovati pojavu kavitacije. Stoga, kavitaciju u turbinama je nemoguće u potpunosti spriječiti, ali može se umanjiti utjecaj kavitacije raznim mjerama na efikasnost i održavanje turbine. Glavni zadatak svih tehnika za smanjenje kavitacije je da kontroliraju pad tlaka u turbinskom prostoru.

5.1 Metoda upuhivanja zrak

Metoda upuhivanja zraka je česta metoda koja se koristi pri smanjenju utjecaja kavitacije na rad turbine. Rad turbine pri djelomičnom, punom opterećenju i preopterećenju uzrokuje povećanje dinamičke nestabilnosti zbog kavitacijskog protoka fluida što rezultira pulsacijama tlaka i oscilacijama snage. Dodavanje okolnog zraka u protok jedan je od praktičnih načina za smanjenje tih pulsacija. U mnogim slučajevima, amplituda takvih pulsacija može se znatno smanjiti ubrizgavanjem zraka ispod rotora tijekom rada turbine. Kod ove metode tlačeni zrak se upuhuje na horizontalnoj ravnini središnje linije rotora na ispusnom prstenu. Za svaku točku upuhivanja, protok zraka kroz sve cijevi odvija se pri konstantnom tlaku i stalnom protoku.

Prethodna istraživanja pokazala su da ubrizgavanje zraka kroz središte konusa rotora značajno smanjuje amplitudu tlakova pulsacija pri djelomičnom i punom opterećenju. U različitim dijelovima hidrauličkih turbina, brzina pulsacija tlaka smanjena je gotovo dvostruko ubacivanjem zraka u protok turbine [17].

5.2 Poboljšanje konstrukcije prostora turbine i profila lopatica

Rotor je najosjetljiviji na kavitaciju, a karakteristike učinkovitosti hidrauličke turbine uvelike ovise o profilu površine lopatica rotora, na što treba usmjeriti najviše pažnje. Kavitacija se može procijeniti analizom raspodjele tlaka i brzine na površini lopatica. Raspodjela tlaka i brzine ovisi o zakrivljenosti i debljini hidroprofila, njihovoj raspodjeli, kutu nastrujavanja fluida, omjeru promjera središnjeg dijela i vrha, te omjeru širine i koraka lopatice. Najbolji način za smanjenje kavitacije je proširenje prostora turbine i poboljšanje dizajna profila lopatica, čime se izbjegava vrlo nizak tlak u tekućini, posebno tijekom rada izvan optimalnih uvjeta. Parametre koje je bitno poboljšati su nagib lopatica na ulazu i izlazu, raspodjelu kuta nastrujavanja i sam profil lopatica. Duljina profila lopatica blizu središnjeg dijela može se povećati korištenjem raspodjele kuta protoka za bolju otpornost na kavitaciju. Kut privodećih lopatica također je ključan za regulaciju i kontrolu ravnomjernog protoka od prednjeg do stražnjeg ruba lopatica [18].

5.3 Instalacija turbine na odgovarajućoj visini iznad razine odvodnog kanala

Postavljanje hidrauličke turbine na odgovarajuću visinu iznad razine odvodnog kanala smanjuje rizik od kavitacije i ublažava varijacije u performansama turbine. To je jedan od ključnih parametara koji se moraju uzeti u obzir prilikom instalacije turbine. Apsolutni tlak na izlazu iz rotora opada s povećanjem visine usisa. Ovo postaje kritično pri djelomičnom opterećenju zbog pada razine vode u odvodnom kanalu.

$$\sigma = \frac{NPSE}{gH} = \frac{H_{atm} - H_v - H_s}{H} \quad (1)$$

gdje je:

σ – Thoma faktor kavitacije

$NPSE$ – neto pozitivna usisna snaga

g – ubrzanje sile teže

H – neto visina

H_{atm} – visina atmosferskog tlaka

H_v – visina tlaka pare

H_s – statička usisna visina turbine

Iz jednadžbe (1) je jasno da će faktor kavitacije porasti s padom usisne visine kako bi turbina mogla raditi u sigurnoj zoni. Kod turbina s visokim specifičnim brzinama kao što su propellerske i Kaplan turbine, brzina na izlazu iz rotora je vrlo visoka, što smanjuje tlak na izlazu iz rotora i time povećava rizik od kavitacije. Stoga visina usisa igra vrlo važnu ulogu u kontroli rizika od kavitacije. Primarni cilj je pronaći odgovarajuću visinu postavljanja hidrauličkih turbina kako bi se kontrolirale varijacije u učinkovitosti i smanjila vjerojatnost erozije uzrokovane kavitacijom [18].

5.4 Sprječavanje kavitacije korištenjem tehnika otpornih na eroziju

Kao što je ranije navedeno kavitacija je neizbježna i njezina pojava oštećuje materijal komponenata turbine koje su osjetljive na kavitaciju zbog zamora materijala i erozije. Erozijski materijal komponenata ne samo da utječe na normalan rad turbine, već i potiče daljnju kavitaciju. Stoga materijal korišten za komponente turbine mora biti dovoljno čvrst da izdrži eroziju. Za tu svrhu koriste se razne tehnike kao što su katodna zaštita, površinsko premazivanje i materijali otporni na kavitaciju. Katodna zaštita koristi se za povećanje otpornosti na koroziju metalnih površina primjenom istosmjerne struje na lopatice rotora iz vanjskih izvora, pri čemu veličina električne struje i napona ovisi o veličini rotora i kvaliteti premaza. Ovaj proces uzrokuje oslobađanje vodika iz tekućine kroz reakcije oksidacije i redukcije, stvarajući zaštitni sloj na površinama lopatica. Osim toga, standardna metoda za zaštitu materijala od kavitacijske erozije jest korištenje prikladnih tvrdih premaza, čije su ključne karakteristike otpornost na kavitaciju, koroziju, abrazijsko djelovanje, ublažavanje vibracija i jednostavna primjena na licu mjesta.

Premazi poput tvrdih premaza na bazi legura, keramičkih pasti i keramičkih boja često se koriste u ovakvim primjenama. Uz to, odabir odgovarajućeg materijala i načina proizvodnje od

velike je važnosti za sprječavanje kavitacije kod vodnih turbina. Dok lijevano željezo pokazuje slabu otpornost na kavitaciju zbog većeg sadržaja ugljika, lijevani čelik nudi bolju opciju zbog svoje sposobnosti zavarivanja. Naime, oštećeni dijelovi uslijed kavitacije mogu se lako popraviti zavarivanjem, pri čemu zavareno područje može biti otpornije na kavitaciju u usporedbi s običnim površinama [18].

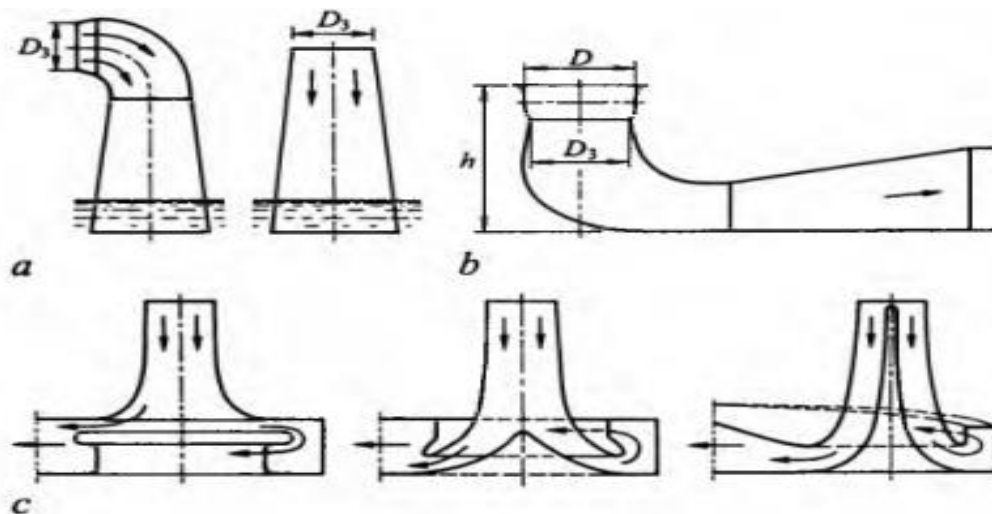
6. PROBLEM KAVITACIJE U DIFUZORU TURBINE

6.1 Princip rada difuzora

Difuzor, aspirator ili odsisna cijev ključan je dio svake hidroelektrane koja koristi reakcijske turbine, dok akcijske turbine nemaju difuzor. Glavna svrha difuzora je prenijeti vodu od izlaza rotora do donje vode. Kada fluid prolazi kroz turbinu ili pumpu, brzina fluida raste dok tlak opada zbog promjene kinetičke energije. Difuzor usporava protok fluida i povećava tlak, čime omogućuje efikasno prenošenje energije i njenu pretvorbu u koristan rad. Odsisna cijev omogućava da se turbina postavi iznad razine donje vode bez gubitka raspoloživog tlaka. Pad tlaka na ulazu difuzora uzrokovan je visinskom razlikom između turbine i donje vode; manja visinska razlika dovodi do manjeg pada tlaka. Postavljanje turbine na različite visine između gornje i donje vode ne utječe na raspoloživi neto pad vode. Razlika u visini između gornje i donje vode naziva se bruto padom, dok se neto pad odnosi na bruto pad smanjen za gubitke u dovodnim i odvodnim cijevima turbine. Sekundarna funkcija difuzora je smanjenje gubitaka energije na izlazu i povećanje ukupne efikasnosti turbine. To se postiže povećanjem poprečnog presjeka difuzora od ulaza prema izlazu, što smanjuje brzinu fluida i povećava tlak, čime se kinetička energija vode smanjuje i voda se efikasno usmjerava prema odvodnom kanalu.

Difuzori se mogu klasificirati u četiri glavne kategorije [2]:

- Ravni ili savinuti konični difuzor,
- koljenasti difuzor,
- prošireni difuzor i
- Moody-ev difuzor.



Slika 6.1 Ravni ili savinuti konični (a), koljenasti (b), prošireni i Moody-ev difuzor (c)

6.2 Kavitacija u difuzoru i metode smanjivanja kavitacije

Kavitacija u difuzoru nastaje kada se rad hidroelektrane udalji od optimalne točke rada pogona, što uzrokuje izlaz fluida iz rotora s visokim obodnim brzinama. Zbog djelovanja centrifugalne sile, statički tlak u središtu difuzora postaje vrlo nizak. Kada fluid s višim tlakom dospije do koničnog dijela difuzora, kinetička energija se pretvara u tlačnu energiju, no zbog velikih razlika u tlaku i efekt povratka u prvobitno stanje je teško ostvariv. Ovo rezultira stvaranjem područja povratnog toka u središtu difuzora, gdje dolazi do odvajanja struje i formiranja "mrtve vode". Razlika u brzinama između tog područja i glavnog toka stvara područje s velikom brzinskom razlikom, što dovodi do stvaranja brojnih malih vrtložnih užeta. Ovi vrtlozi se međusobno spajaju i formiraju spiralnu vrtložnu užad koja obavija površinu "mrtve vode". Ova vrtložna užad inducira niske frekvencije pulsacije tlaka, što uzrokuje fluktuacije snage, buku, vibracije i smanjenje ukupne učinkovitosti turbine. Kavitacija se dodatno pojačava pri većim amplitudama oscilacija tlaka.



Slika 6.2 Prikaz strukture vrtložnog užeta kod Francis turbine [20]

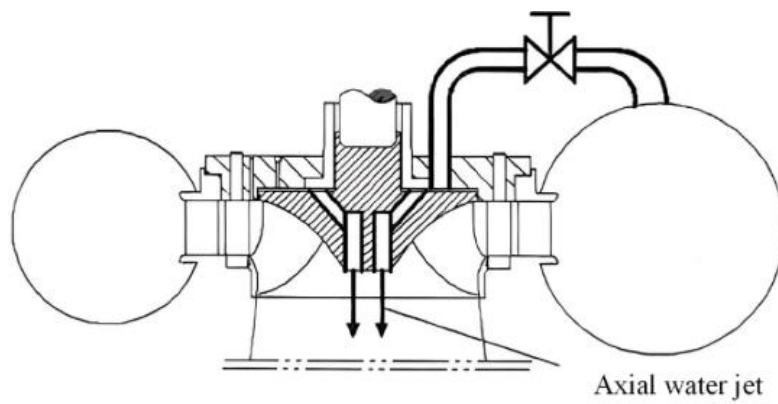
Vrtložna užad u difuzoru glavni je uzrok nestabilnog rada u hidroturbinskom postrojenju. Niskofrekventne pulsacije tlaka uzrokovane ovom vrtložnom užadi povećavaju vibracije, oštećenja lopatica te smanjuju vijek trajanja hidroturbinskog postrojenja, a mogu čak izazvati rezonanciju s prirodnom frekvencijom elektrane, ozbiljno ugrožavajući njen normalan rad. Postoje dvije kategorije rješenja kako kontrolirati kavitaciju u difuzoru, a to su metoda pasivne kontrole protoka i aktivna kontrola protoka.

Pasivna kontrola protoka fluida kroz turbinu temelji se na dizajnu i konstrukciji privodećih elemenata fluida, rotora i difuzora. Mjenjanjem geometrijske strukture komponenti postiže se pravilnije stanje protoka fluida i smanjuje vrtložna brzina u difuzoru. Ova metoda uključuje upotrebu statičkih elementa kao što su prstenovi i pregrade unutar difuzora. Elementi za kontrolu protoka fluida imaju svrhu mijenjati putanju i brzinu fluida time smanjujući turbulencije što direktno utječe na smanjivanje formiranja vrtložnih užadi.



Slika 6.3 Shematski prikaz postavljene pregrade na ulazu u difuzor [20]

Aktivne tehnike kontroliranja protoka koriste vanjske izvore energije kako bi se dinamički utjecalo na protok fluida. Jedna od metoda je ranije spomenuto upuhivanje zraka, a druga popularna metoda je ubrizgavanje vode. Ubrižgavanje vode u difuzor turbine obično se provodi tangencijalno ili aksijalno, a služi za suzbijanje vrtložnih užeta i pulsacija tlaka. Tangencijalno ubrizgavanje vrši se pomoću mlaznice postavljene na zidu difuzora pod određenim kutom. Dok se aksijalno ubrizgavanje vode u difuzor vrši duž osi rotora turbine. Međutim implementacija ovih metoda veže uz sebe dodatne troškove u obliku potrebnih popratnih strojeva poput pumpi, ali i troškove održavanja i same instalacije [20].



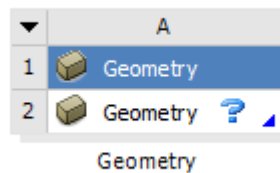
Slika 6.4 Shematski prikaz aksijalnog ubrizgavanja vode [20]

7. NUMERIČKA ANALIZA STRUJANJA KROZ DIFUZOR

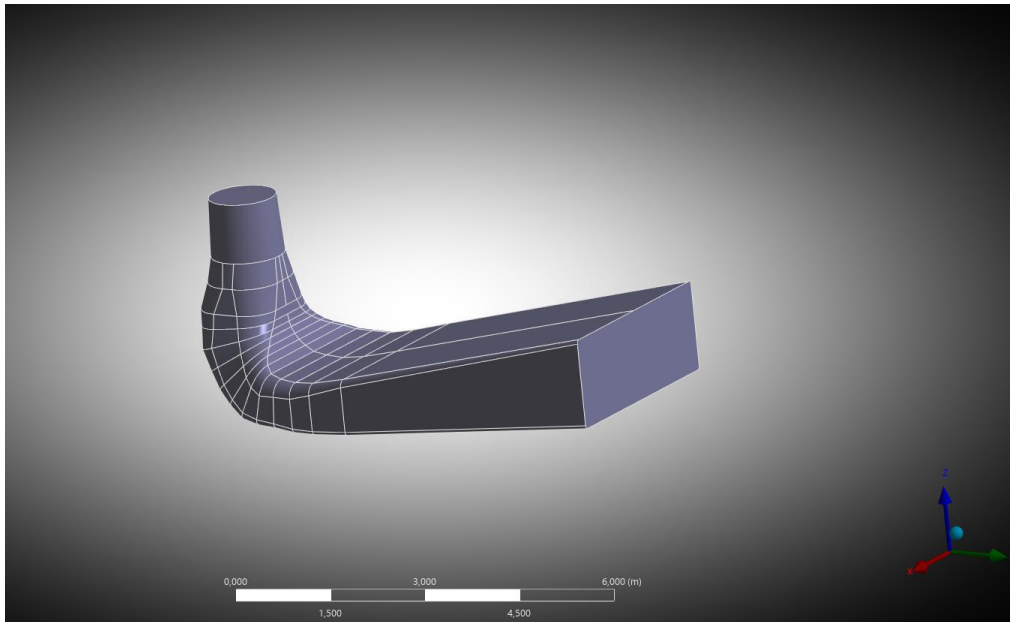
7.1 Izrada numeričke mreže

Programski paket Ansys jedan je od najpoznatijih i upotrebljivanih softverskih alata u svrhe simulacija i analize raznih geometrija i modela u realnim uvjetima. Za difuzor je potrebno pažljivo generirati numeričku mrežu koja će u istom trenutku biti dovoljno dobra da pruži pouzdane i precizne rezultate, ali i važno je optimizirati broj elemenata u mreži radi optimalnog vremena izračuna rezultata. Povećanje broja elemenata rezultira duljim trajanjem simulacije jer se u svakom segmentu mreže iterativno rješavaju složene Navier-Stokesove jednačbe.

Prvi korak izrade simulacije je izrada geometrije koja se želi promatrati. To se može napraviti u bilo kojem 3D softverskom programu. Tema ovog rada nije sama konstrukcija difuzora već promatranje strujanje fluida kroz difuzor stoga će se koristiti gotova geometrija. Naredni korak je učitavanje geometrije difuzora u program Ansys Fluent, ali pritom treba paziti na ekstenziju datoteke te ga promijeniti u .STP kako bi ga program mogao uspješno otvoriti. Otvarajući Ansys Fluent vidi se pregršt modula, a za početak odabire se “Geometry”.

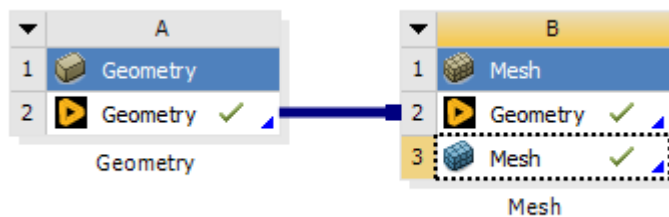


Slika 7.1 Izabran je modul za učitavanje ili izradu geometrije



Slika 7.2 Učitana geometrija difuzora

Nakon što se učita geometrija difuzora potrebno je ubaciti modul Mesh zbog generiranja numeričke mreže, te spojiti geometriju difuzora sa modulom Mesh.

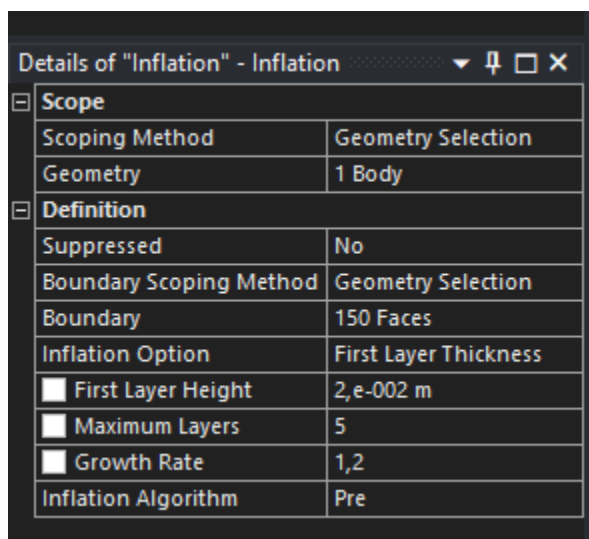


Slika 7.3 Izabran modul Mesh za izradu numeričke mreže

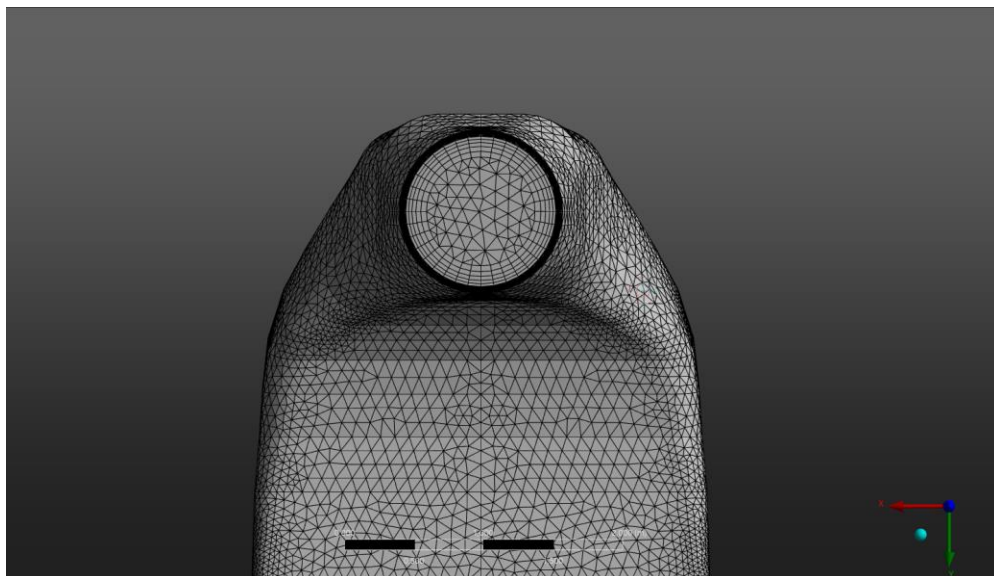
Nakon izrade početne numeričke mreže, potrebno je podesiti numeričku simulaciju na CFD postavke pošto je početno stanje programa namješteno na Mechanical postavke jer je ipak zadatak provesti simulaciju protoka fluida. Drugi važan korak pri izradi numeričke mreže je podijeliti mrežu na više elemenata od početnog stanja kako bi bila preciznija i točnija, no treba uzeti u obzir

da povećanje elemenata u mreži znači i duže vrijeme proračuna. Uzimajući to u obzir veličina elementa je postavljena na 0,1m te se mreža sada sastoji od 138348 čvorova i 356923 elemenata.

Zatim potrebno je dodati još elemenata uz stijenke, gdje je brzina jednaka nuli kako bi se točno prikazala promjena brzine uzduž stijenke. Ova funkcija se vrši pomoću naredbe Inflation. Za početak je potrebno definirati geometriju, odnosno obilježiti cijelo oplošje difuzora, nadalje izabire se opcija inflacije koja će u ovom slučaju biti "First Layer Thickness", zatim se podešava visina prvog sloja na 0,02m te za kraj potrebno je definirati u opciji "Maximum Layers" maksimalan broj slojeva. U ovoj simulaciji je definirano na 5 slojeva.



Slika 7.4 Prikaz podešenih opcija inflacije

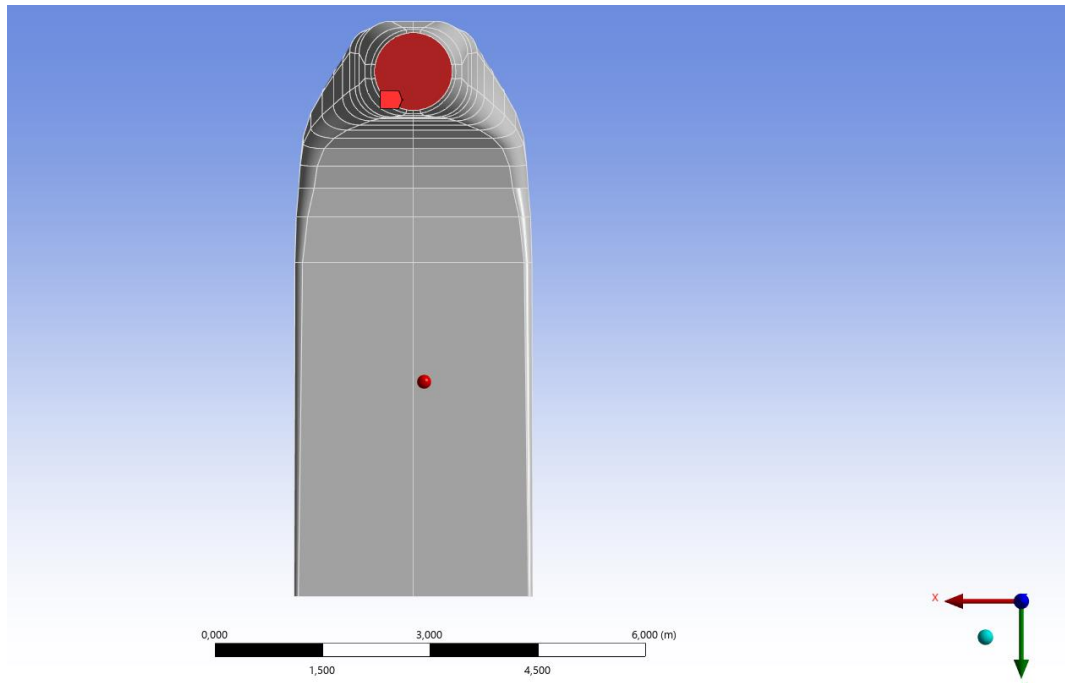


Slika 7.5 Inflacija ulaznog presjeka difuzora

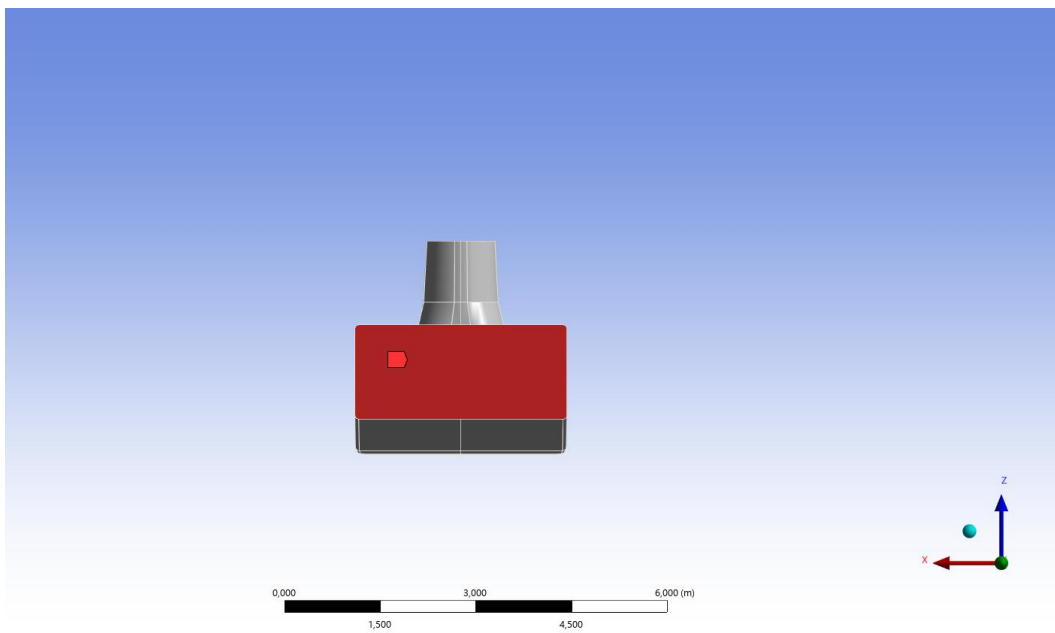


Slika 7.6 Inflacija izlaznog presjeka difuzora

Zbog potrebe simulacije potrebno je definirati rubne uvjete, odnosno mjesto ulaza i izlaza fluida iz difuzora. Ulazni presjek difuzora označen je kao “Inlet”, dok je izlazni presjek označen kao “Outlet”. Ti su dijelovi prikazani na slikama 7.7. i 7.8.



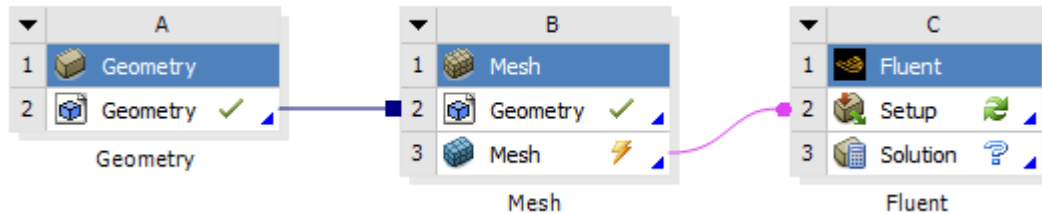
Slika 7.7 "Inlet"



Slika 7.8 "Outlet"

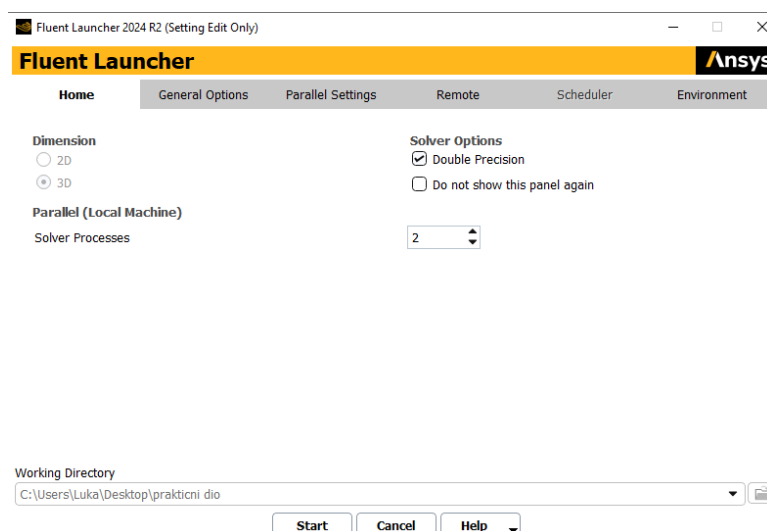
7.2 Izrada simulacije

Posljednji korak pri izradi simulacije je ubacivanje modula za provođenje same simulacije. Numerička mreža “Mesh” povezuje se sa simulacijskim modulom “Fluent”.

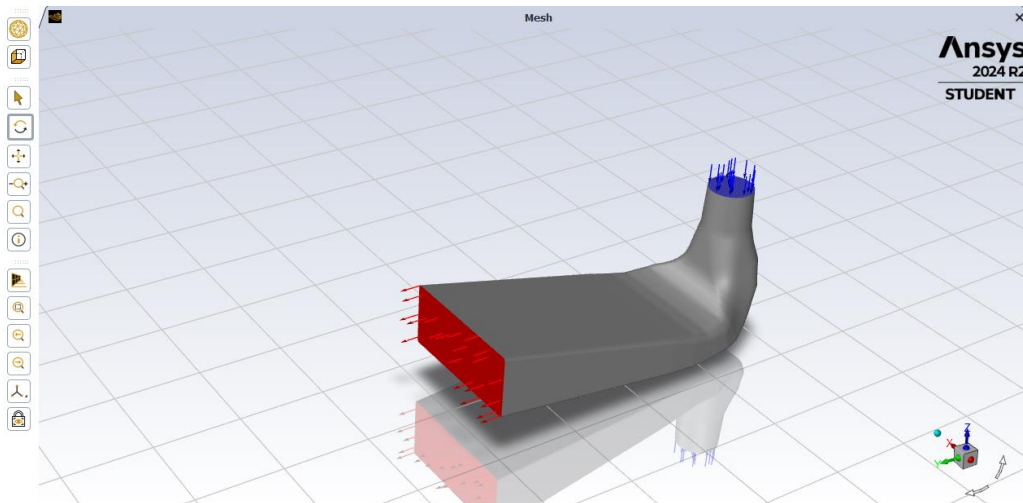


Slika 7.9 Izabran modul za simulaciju

Nakon otvaranja modula “Fluent” bira se “Double Precision” što znači da će računati sa dvostruko više decimala te je potrebno definirati koliko će jezgara sudjelovati u proračunu što naravno ovisi o samoj moći računala kojim se provodi simulacija. U ovom slučaju su izabrane dvije jezgre slika 7.10.

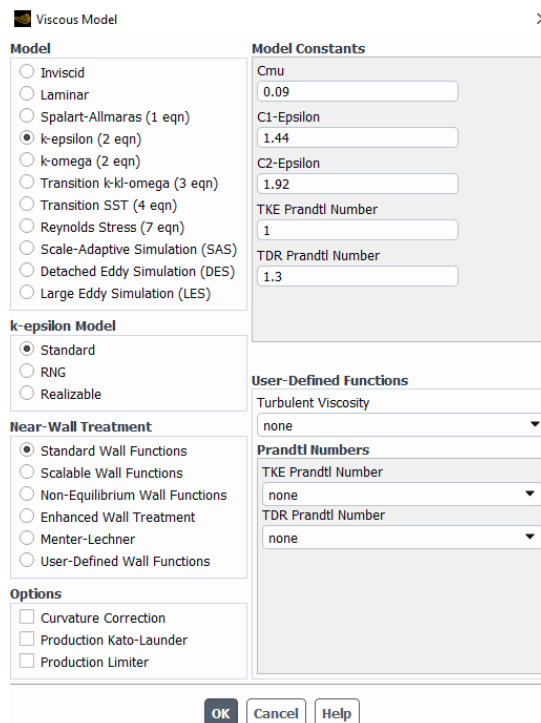


Slika 7.10 Podešavanje simulacije



Slika 7.11 Učitani model difuzora u "Fluent" rješavaču

I izabire se k-epsilon turbulentni model za opisivanje strujanje fluida kroz difuzor (slika 7.12).



Slika 7.12 Postavke turbulentnog strujanja

Zatim je potrebno postaviti za koji radni medij se provodi simulacija, u ovom slučaju to će biti voda što znači da je potrebno promijeniti postavke iz zraka u vodu. Ovaj postupak se izvodi na način da u opcijama “Cell zone conditions” se izabire voda kao radni medij, te odabirom “Apply” primjenjuju se novi uvjeti.

Nakon toga, parametri rubnih uvjeta biraju se pomoću naredbe “Boundary Conditions”. Zadan je volumni protok koji iznosi $8\text{m}^3/\text{s}$. Za “Inlet” je potrebno definirati maseni protok na ulazu, koji se izračunava pomoću izraza:

$$\dot{m} = \dot{V} \cdot \rho$$

gdje je:

\dot{m} – maseni protok

\dot{V} – volumni protok

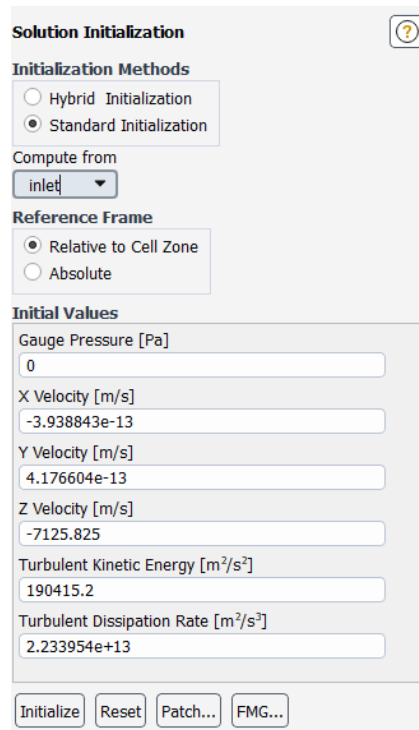
ρ – specifična gustoća fluida

Voda pri sobnim uvjetima ima gustoću od 998.207 kg/m^3 , te se uvrštava u gornji izraz.

$$\dot{m} = 8 \cdot 998,207$$

$$\dot{m} = 7985,607\text{ kg/s}$$

Za “Outlet” se postavlja vrsta “pressure-outlet”, pri čemu se “Gauge Pressure” postavlja na 0 Pa , što znači da je tlak na izlazu difuzora jednak atmosferskom tlaku. Na kraju, definira se i posljednji rubni uvjet “wall”. Budući da je brzina fluida uz stijenke nula, odabiru se postavke “Stationary Wall” i “No slip”.



Slika 7.13 Inicijalizacija rješenja

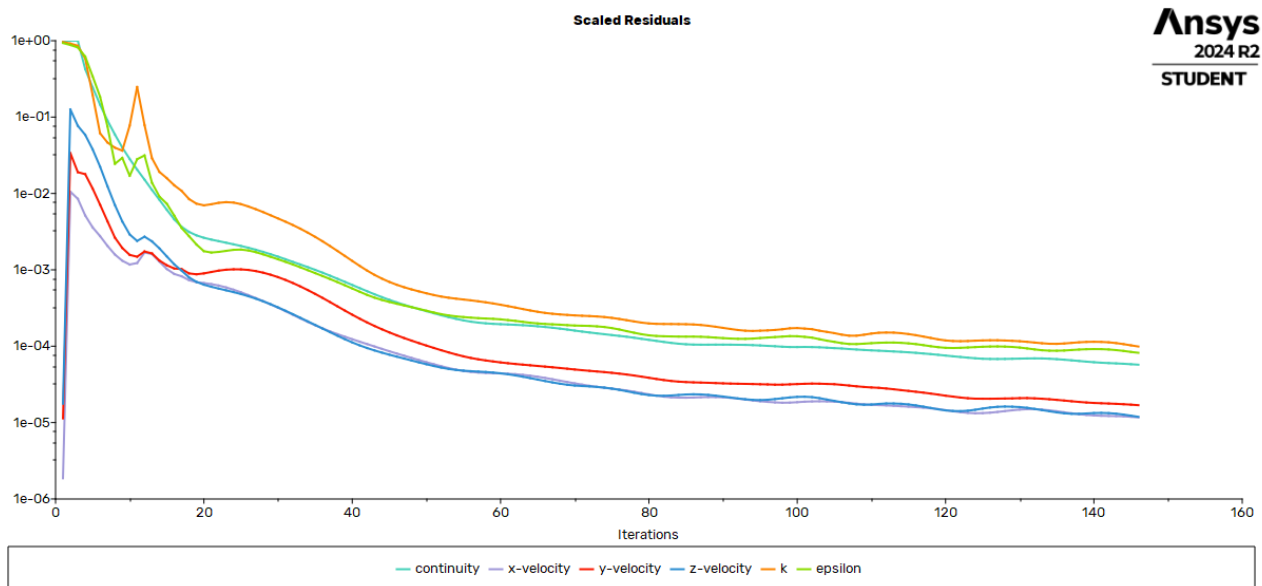
Za potrebe simulacije definiran je maksimalni broj od 500 iteracija, nakon čega je pokrenut izračun, odnosno sama simulacija.

8. REZULTATI

U narednim potpoglavljima prikazani su dobiveni rezultati simulacijom gdje će se analizirati tlakovi i brzine.

8.1 Graf konvergencije

Na slici 8.1. je prikaz grafa konvergencije. Može se zaključiti da je rješenje konvergiralo, odnosno da su reziduali ispunili zadani kriterij. Proces inicijalizacije se ponavlja sve dok rješenja Navier-Stokesovih jednadžbi ne dosegnu zadanu razinu pogreške. Zadani uvjet konvergencije postignut je oko 150-te iteracije, zbog čega nije bilo potrebno nastaviti simulaciju do 500 iteracija.

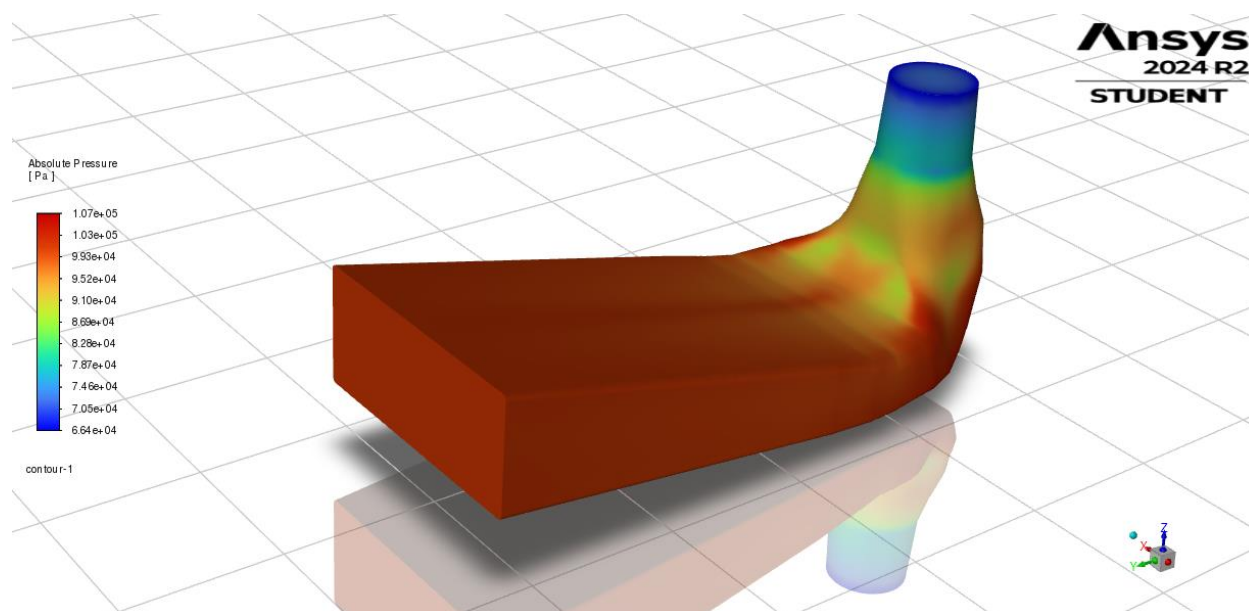


Slika 8.1 Graf konvergencije

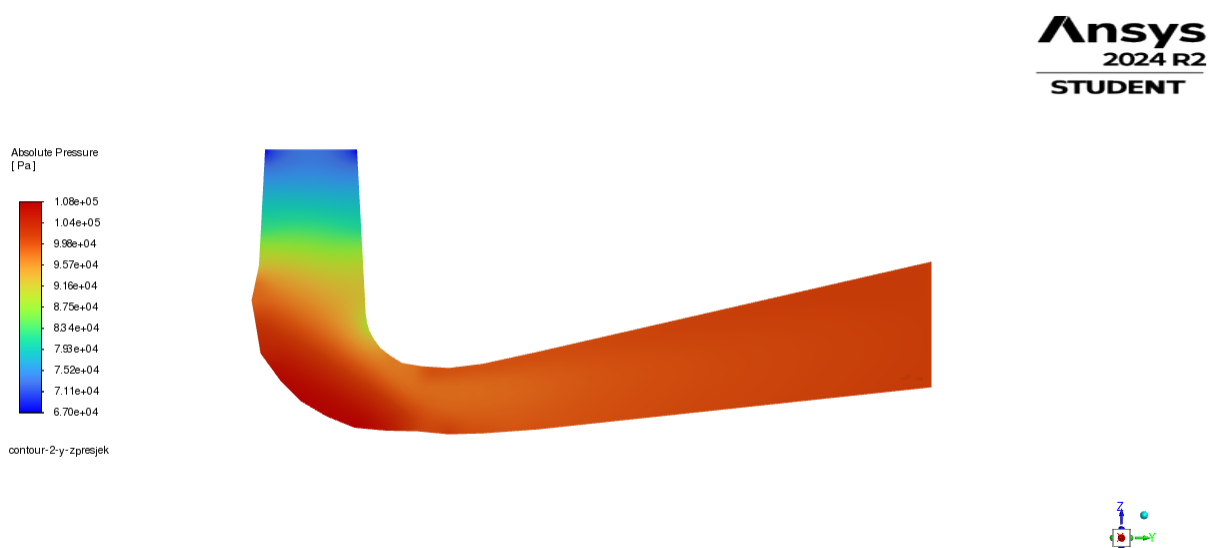
8.2 Statički, dinamički i apsolutni tlak

Prikazane slike 8.2. i 8.3. prikazuju raspodjelu apsolutnog tlaka u difuzoru. Apsolutni tlak je zbroj statičkog i dinamičkog tlaka, gdje statički tlak označava energiju koju fluid posjeduje u

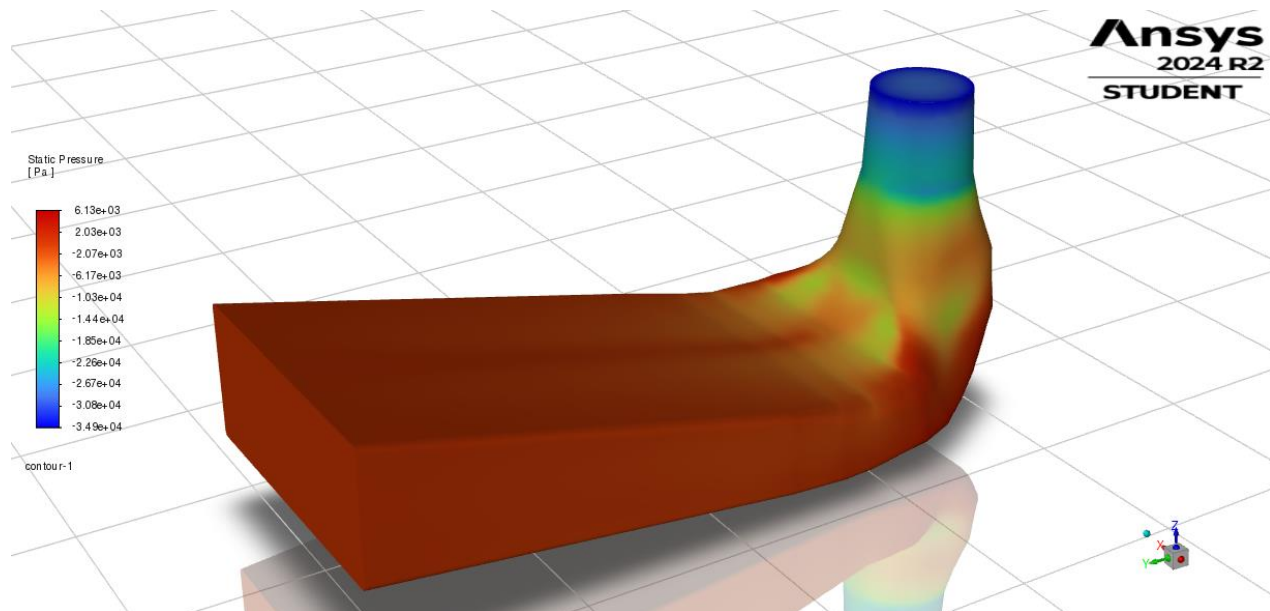
mirovanju, dok dinamički tlak odražava energiju kretanja fluida. Najniži apsolutni tlak javlja se na ulazu u difuzor, dok je najveći na izlazu iz difuzora, gdje se tlak izjednačava s atmosferskim tlakom od 1 bar. Na temelju ovih prikaza mogu se uočiti zone koje imaju potenciju ostvarivanja uvjeta za pojavu kavitacije u područjima vrlo niskog tlaka.



Slika 8.2 Prikaz distribucije apsolutnog tlaka u difuzoru

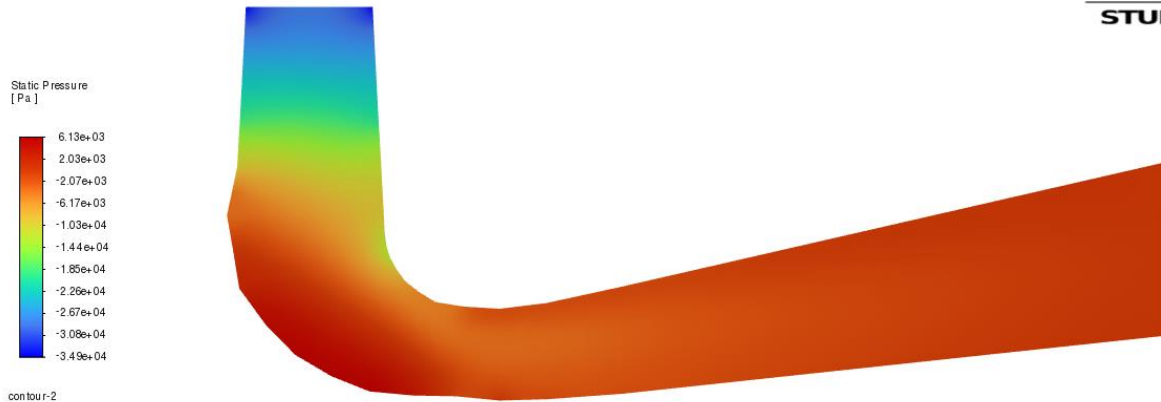


Slika 8.3 Prikaz distribucije apsolutnog tlaka u YZ presjeku difuzora

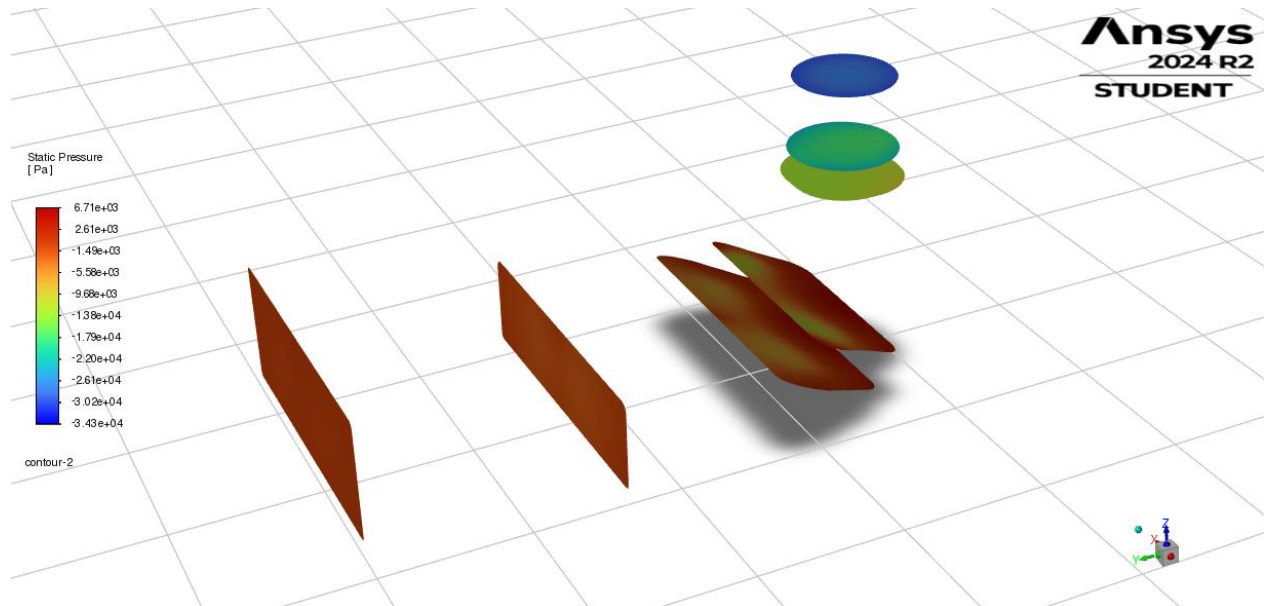


Slika 8.4 Statički tlak na stijenama difuzora

Na slici 8.4. kao i na slikama 8.5. i 8.6. prikazana je distribucija statičkog tlaka unutar difuzora te raspodjela statičkog tlaka po presječnim ravninama difuzora. Iz tih slika vidljivo je da je statički tlak najniži na ulazu u difuzor, a potom se postupno povećava duž difuzora. Ova promjena u statičkom tlaku može biti značajna u kontekstu pojave kavitacije kao što je prije rečeno kavitacija se javlja kada statički tlak padne ispod tlaka zasićenja tekućine, što može dovesti do stvaranja mjehurića pare. U difuzoru, gdje je tlak na ulazu najniži, postoji veći rizik za pojavu kavitacije, pogotovo ako su uvjeti toka i svojstva fluida pogodni za pad tlaka ispod razine zasićenja. Povećanje tlaka kroz difuzor uzrokuje implozije mjehurića, ali također može uzrokovati štetu na stijenama difuzora.



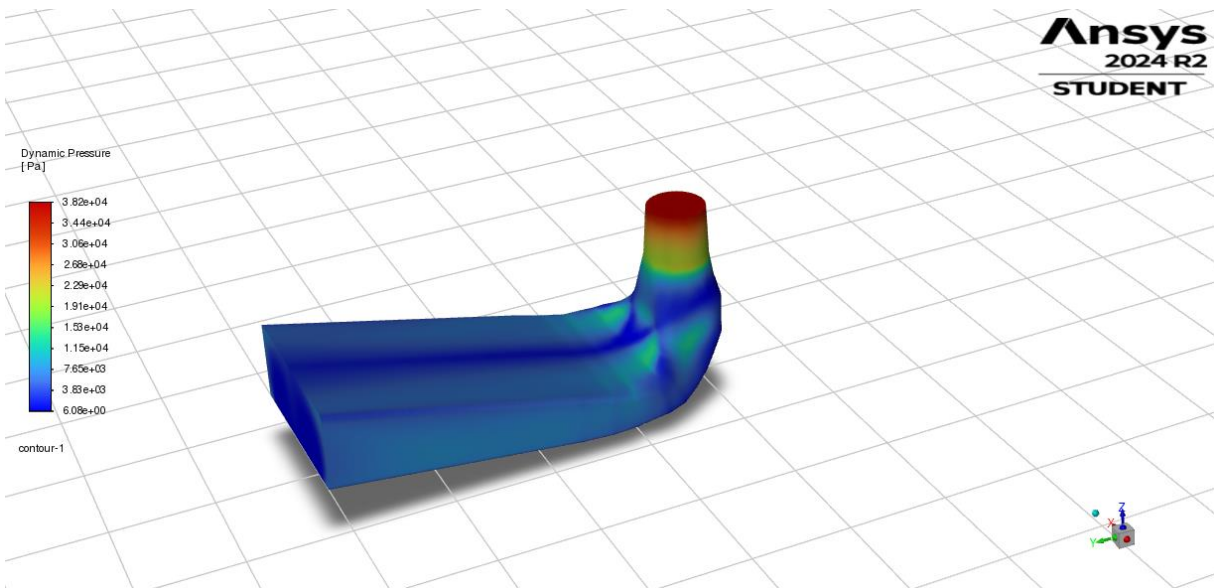
Slika 8.5 Prikaz distribucije statičkog tlaka u YZ presjeku difuzora



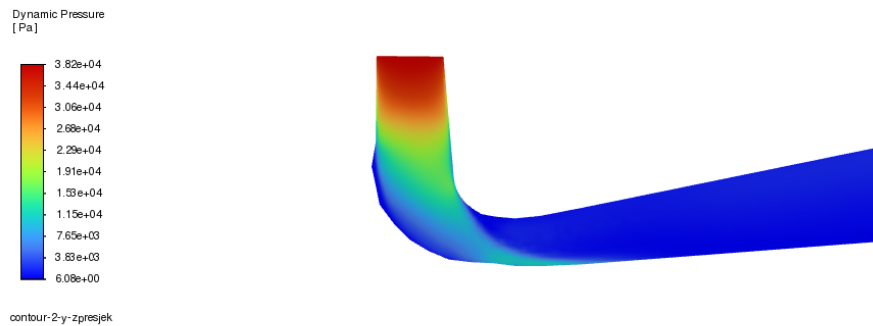
Slika 8.6 Prikaz raspodjele statičkog tlaka po proizvoljnim poprečnim presjecima difuzora

Prema istom principu izrađene su konture i za dinamički tlak u difuzoru. Ako se promotri slika 8.7., na kojoj je prikazana distribucija dinamičkog tlaka kroz difuzor, te slike 8.8. i 8.9., koje

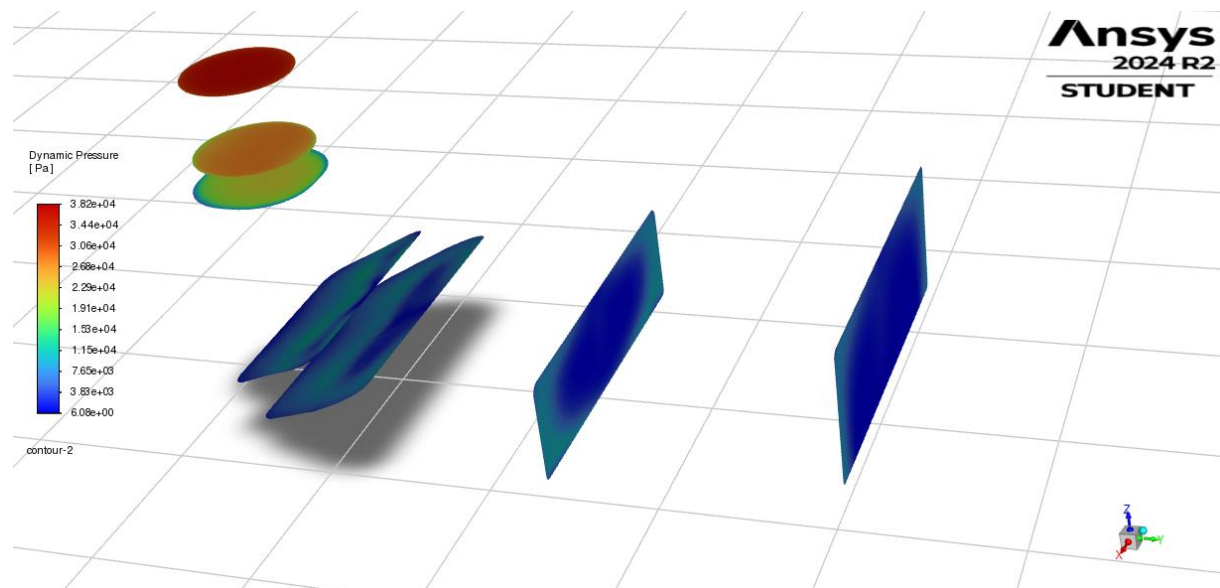
prikazuju distribuciju dinamičkog tlaka na presječnim ravninama, može se primijetiti suprotan obrazac u usporedbi sa statičkim tlakom. Na ulazu u difuzor dinamički tlak je najveći, dok se prema izlazu postupno smanjuje. Sličan trend je prisutan i kod raspodjele brzina. Naime, veći dinamički tlak na ulazu u difuzor može smanjiti statički tlak ispod kritične razine, što povećava rizik od pojave kavitacije, posebno u područjima gdje fluid naglo ubrzava, stvarajući uvjete pogodne za formiranje mjehurića pare. Kako se dinamički tlak smanjuje prema izlazu, statički tlak raste, što može dovesti do implozije nastalih mjehurića i potencijalno uzrokovati oštećenje strukture difuzora.



Slika 8.7 Prikaz distribucije dinamičkog tlaka u difuzoru



Slika 8.8 Prikaz distribucije dinamičkog tlaka u YZ presjeku difuzora

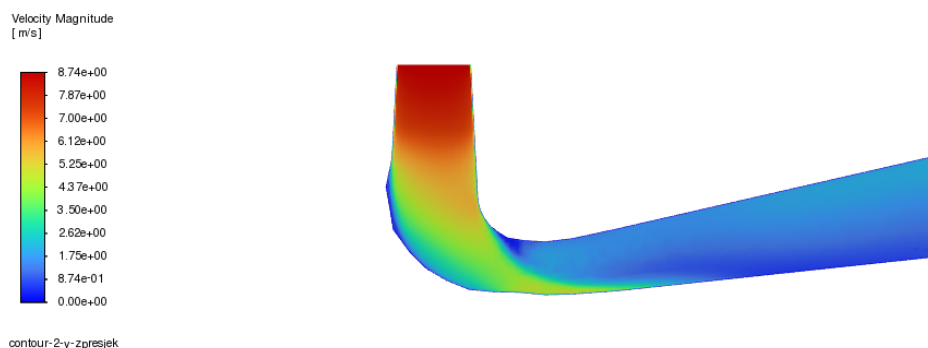


Slika 8.9 Prikaz raspodjele dinamičkog tlaka po proizvoljnim ravnima difuzora

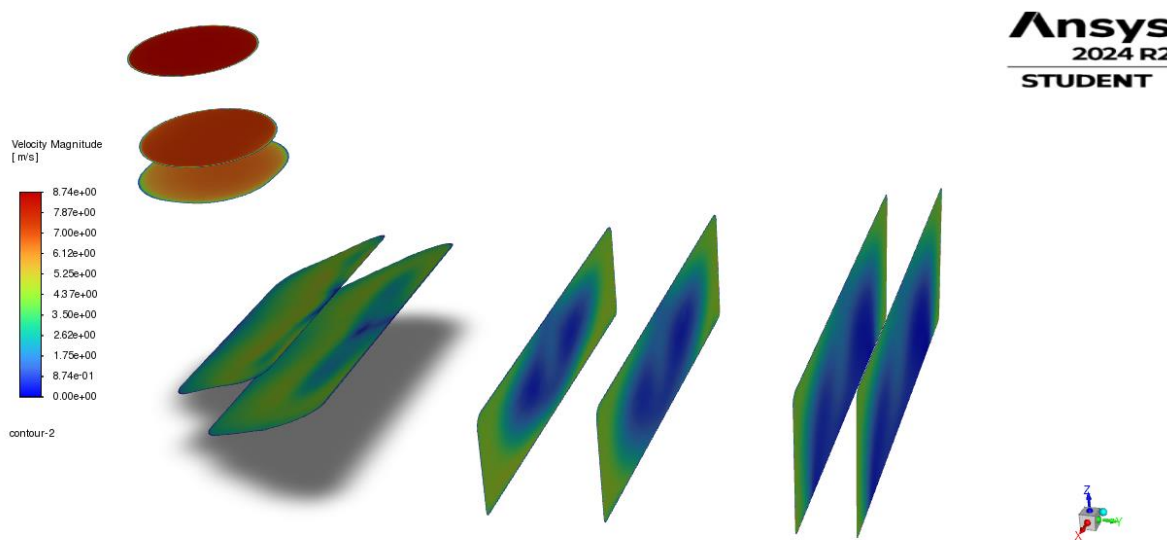
8.3 Brzine strujanja fluida

Iz slika 8.10. i 8.11. jasno se vidi distribucija brzina u odabranim ravninama kroz difuzor. Može se primijetiti da je brzina fluida na ulazu u difuzor najveća, dok na izlazu iz difuzora

najmanja. Također, ranije je navedeno da raspodjela brzine u difuzoru gotovo odgovara raspodjeli dinamičkog tlaka, jer dinamički tlak prati brzinu strujanja fluida.

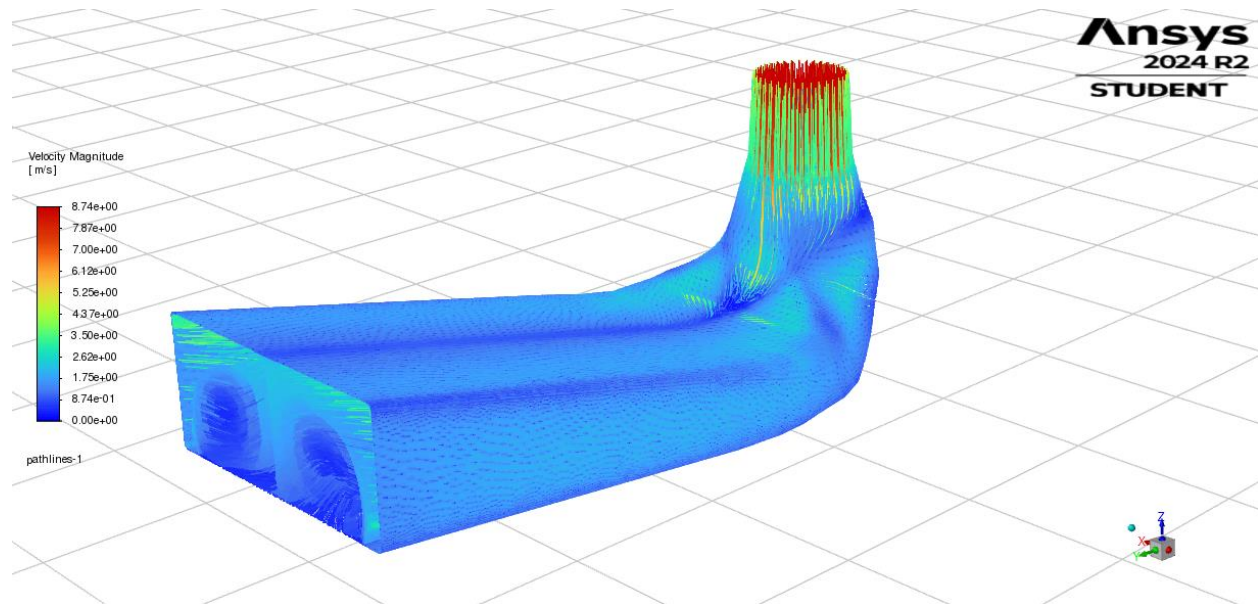


Slika 8.10 Prikaz kontura brzine u difuzoru presjeka YZ ravninom



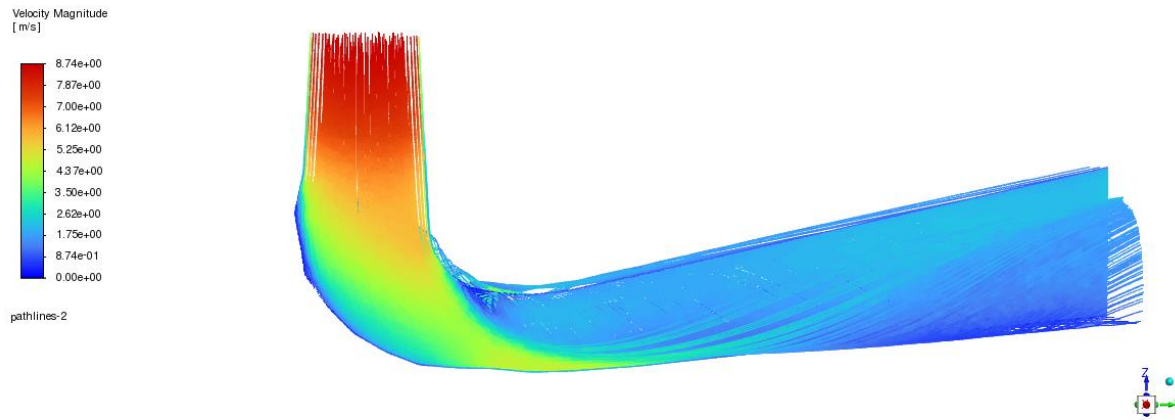
Slika 8.11 Prikaz kontura brzina za odabrane presjeke difuzora

Na slici 8.12 prikazana je raspodjela brzina koristeći strujnice koje su odličan alat za prikazivanje gibanje fluida. Uočava se da je brzina na ulazu u difuzor najviša dok bi prema izlazu difuzora trebala opadati. Ovakav prikaz je znatno prikladniji od prikaza kontura koji je korišten u prethodnim slikama, jer omogućuje detaljniji uvid u tok fluida kroz difuzor. Crvena boja simbolizira najveću brzinu dok plava boja simbolizira najmanju brzinu.



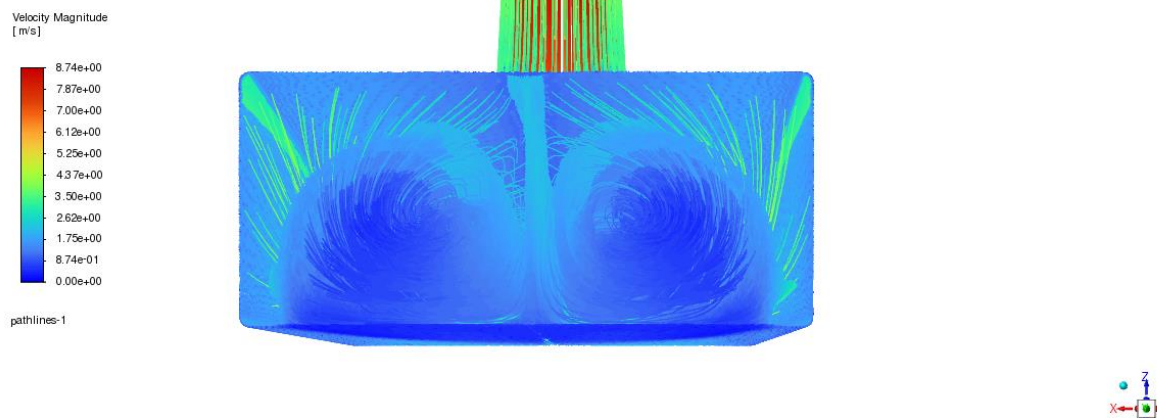
Slika 8.12 Prikaz strujnica fluida obojanih po brzini strujanja

Slika 8.13 još jasnije prikazuje tok fluida u difuzoru. Vidi se prikaz uvjeta kojeg smo prethodno zadali, a to je da je brzina jednaka nuli uz stijenke difuzora te da se povećava prema sredini difuzora. Na izlazu iz difuzora vidi se pad brzine strujanja, ali i stvaranje vrtložnih formacija koje se stvaraju zbog niza faktora kao što su: nagla promjena geometrije, smanjenje brzine i povećanje tlaka, turbulencije i neujednačen protok.



Slika 8.13 Prikaz strujnica difuzora presječenog YZ ravninom

S obzirom na simetričnost difuzora, formiranje dva vrtloga na izlazu je također simetrično (slika 8.14). Ovo ukazuje na to da se strujanje fluida odvija na sličan način s obje strane difuzora, što rezultira stvaranje približno jednakih po veličini i intezitetu vrtloga na lijevoj i desnoj strani. Upravo u takvim područjima dolazi do pada tlaka ispod zasićenja fluida što uzrokuje kavitaciju.



Slika 8.14 Prikaz strujnica "Outleta" difuzor

9. ZAKLJUČAK

Zadatak ovog završnog rada bio je izraditi numeričku analizu strujanja fluida kroz odabranu geometriju difuzora vodne turbine. U teorijskom dijelu rada detaljno je objašnjen proces nastanka kavitacije uz pomoć pV i pT dijagrama te je navedena podjela najzastupljenijih tipova kavitacije i njihove tipične karakteristike. Nadalje, pojašnjen je fenomen kavitacije kod najkorištenijih tipova vodnih turbina poput Francis-ove, Kaplan-ove i Pelton-ove turbine. Zatim je kroz dva poglavlja objašnjeno koje su metode pri pravovremenom uočavanju pojave kavitacije i koje su metode pri smanjivanju efekta kavitacije. Ove metode je vrlo bitno poznavati kako bi smanjili negativne posljedice kavitacije poput buke, vibracija i erozije. Konačno u posljednjem poglavlju teorijskog dijela opisana je funkcija i podjela difuzora kod vodnih turbina te je opisana problematika kavitacije u difuzoru i opisana su rješenja za smanjenje iste koja se koriste u praksi.

Nakon teorijskog dijela slijedi numerička analiza koja je objašnjena kroz nekoliko koraka. Prikazan je način učitavanja geometrije te izrada numeričke mreže za zadanu geometriju difuzora. Geometriju je potrebno pravilno umrežiti uzimajući u obzir općeprihvaćena načela. Simulacija je izrađena pomoću programskog paketa Ansys Fluent koji je napredni softverski alat za računalne simulacije dinamike fluida. Rezultati ukazuju na tipičan obrazac ponašanja tlakova i brzina unutar difuzora. Statički tlak je najniži na ulazu u difuzor, a potom se postupno povećava prema izlazu. S druge strane, dinamički tlak ima suprotan obrazac, najveći je na ulazu i smanjuje se prema izlazu iz difuzora. Može se zaključiti kako je ulaz difuzora kritično područje zbog niskog tlaka jer upravo to predstavlja najveći rizik od pojave kavitacije. Ovakve računalne simulacije pokazuju kako mogu biti vrlo koristan alat svakom inženjeru jer omogućuju detaljniji uvid u sliku strujanja fluida kod složenih geometrija, bez potrebe za skupim i vremenski zahtjevnim eksperimentalnim ispitivanjima. Primjena se posebice vidi kod detektiranja kritičnih područja sklonim kavitaciji kod vodnih turbina, čime se može smanjiti rizik od oštećenja dijelova vodne turbine i povećati učinkovitost hidroturbinskog postrojenja.

10. POPIS SLIKA

| | |
|--|----|
| Slika 2.1 Pojava kavitacije i isparavanje [2]..... | 2 |
| Slika 2.2 Prikaz kavitacije putujućih mjehura [1]..... | 4 |
| Slika 2.3 Prikaz kavitacije u oblizu zavjese [1] | 4 |
| Slika 2.4 Kavitacija u obliku oblaka [1] | 5 |
| Slika 2.5 Prikaz superkavitacije [1] | 5 |
| Slika 2.6 Primjer vrtložne kavitacije [1]..... | 6 |
| Slika 3.1 Prikaz Francis-turbine [8]..... | 9 |
| Slika 3.2 Lokacije kavitacijske erozije u Pelton-ovoj turbini [10] | 10 |
| Slika 3.3 Područja formacije kavitacije kod propelernih turbina [13]..... | 12 |
| Slika 4.1 Mjerenje vršnih vrijednosti tlaka [8] | 14 |
| Slika 4.2 Prikaz modela Francis-turbine gdje difuzor ima prozor od pleksiglasa radi promatranja zbijanja u turbini [15]..... | 15 |
| Slika 6.1 Ravni ili savinuti konični (a), koljenasti (b), prošireni i Moody-ev difuzor (c) | 22 |
| Slika 6.2 Prikaz strukture vrtložnog užeta kod Francis turbine [20] | 23 |
| Slika 6.3 Shematski prikaz postavljene pregrade na ulazu u difuzor [20]..... | 23 |
| Slika 6.4 Shematski prikaz aksijalnog ubrizgavanja vode [20] | 24 |
| Slika 7.1 Izabran je modul za učitavanje ili izradu geometrije..... | 25 |
| Slika 7.2 Učitana geometrija difuzora | 26 |
| Slika 7.3 Izabran modul Mesh za izradu numeričke mreže | 26 |
| Slika 7.4 Prikaz podešenih opcija inflacije | 27 |
| Slika 7.5 Inflacija ulaznog presjeka difuzora..... | 28 |
| Slika 7.6 Inflacija izlaznog presjeka difuzora..... | 28 |
| Slika 7.7 “Inlet” | 29 |
| Slika 7.8 “Outlet”..... | 29 |
| Slika 7.9 Izabran modul za simulaciju..... | 30 |
| Slika 7.10 Podešavanje simulacije..... | 30 |
| Slika 7.11 Učitani model difuzora u “Fluent” rješavaču | 31 |
| Slika 7.12 Postavke turbulentnog strujanja..... | 31 |
| Slika 7.13 Inicijalizacija rješenja | 33 |
| Slika 8.1 Graf konvergencije | 34 |
| Slika 8.2 Prikaz distribucije apsolutnog tlaka u difuzoru | 35 |
| Slika 8.3 Prikaz distribucije apsolutnog tlaka u YZ presjeku difuzora..... | 35 |
| Slika 8.4 Statički tlak na stijenkama difuzora..... | 36 |
| Slika 8.5 Prikaz distribucije statičkog tlaka u YZ presjeku difuzora..... | 37 |
| Slika 8.6 Prikaz raspodjele statičkog tlaka po proizvoljnim poprečnim presjecima difuzora | 37 |
| Slika 8.7 Prikaz distribucije dinamičkog tlaka u difuzoru | 38 |
| Slika 8.8 Prikaz distribucije dinamičkog tlaka u YZ presjeku difuzora | 39 |
| Slika 8.9 Prikaz raspodjele dinamičkog tlaka po proizvoljnim ravnima difuzora | 39 |
| Slika 8.10 Prikaz kontura brzine u difuzoru presjeka YZ ravninom | 40 |
| Slika 8.11 Prikaz kontura brzina za odabrane presjeke difuzora | 40 |

| | |
|--|----|
| Slika 8.12 Prikaz strujnica fluida obojanih po brzini strujanja..... | 41 |
| Slika 8.13 Prikaz strujnica difuzora presječenog YZ ravninom | 42 |
| Slika 8.14 Prikaz strujnica "Outleta" difuzor..... | 42 |

11. LITERATURA

- [1] Čarija, Z.: “Vodne turbine”, radni materijal predavanja kolegija Hidraulički strojevi, Rijeka, 2019.
- [2] Krivchenko, G. I.: “Hydraulic Machines, Turbines and Pumps”, MIR Publishers, 1994.
- [3] Kuliš, M., Mijalić, N., Hodžić S.: “Detekcija kavitacije na hidrauličkim strojevima”, 2008.
- [4] S interneta: <https://www.scubalife.hr/sto-je-superkavitacija-i-kako-je-iskoristiti/>
- [5] Khurana S., Navtej and Hardeep S.: “Effect of Cavitation on Hydraulic Turbines- A Review”, International Journal of Current Engineering and Technology, 2012.
- [6] S interneta: <https://iamchaitanya.wordpress.com/2016/05/24/cavitation/>
- [7] Escaler X. i suradnici; “Detection of cavitation in hydraulic turbines”, 2006.
- [8] Ece Ayli: “Cavitation in Hydraulic turbines”, Ankara, 2019.
- [9] Luo XW., Ji B., Tsujimoto Y.: “A review of cavitation in hydraulic machinery”, Journal of Hydrodynamic, 2016.
- [10] Rossetti A, Pavesi G, Ardizzon G, Santolin A.: “Numerical analyses of cavitating flow in a Pelton turbine”, Journal of Fluids Engineering, Padova, 2014.
- [11] Li SC.: “Cavitation of hydraulic machinery”, Imperial College, 2000.
- [12] Cai SQ.: “Cavitation occurring in capillary tubes”, 2019.
- [13] Ceccio S. L., Brennen, C. E.: “Partial cavity flows. Part 1. Cavities forming on models without spanwise variation”, Journal of Fluid Mechanics, 1991.
- [14] Iliescu M. S., Ciocan G. D., Avellan F.: “Analysis of the Cavitating Draft Tube Vortex in a Francis Turbine”, Vol. 130, Journal of Fluids Engineering, 2008.
- [15] Koivula T., Ellman A. i Vilenius M.: “Experiences on cavitation detection methods. in Proceeding”, Tampere, 2000.
- [16] Minakov A. i suradnici: “Experimental study of the effect of air injection on the pressure pulsations in the hydro turbine flow path under different operating conditions”, 2017.
- [17] Brijkishore, Ruchi K., Prasad V.: “Prediction of cavitation and its mitigation techniques in hydraulic turbines”, Madhya Pradesh, 2021.
- [18] S interneta: [turbina_vodna.pdf \(lzmk.hr\)](turbina_vodna.pdf)
- [19] Wang L., Cui J. i suradnici: “Research on the Vortex Rope Control Techniques in Draft Tube of Francis Turbines”, 2022.
- [20] S interneta: <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent>

12. SAŽETAK

U ovom radu napravljen je pregled postojećih rješenja za smanjivanje ili otklanjanje kavitacije kod vodnih turbina te su objašnjeni osnovni pojmovi vezani za nastanak kavitacije. Drugi dio zadatka je bio izraditi računalnu simulaciju protoka fluida unutar difuzora Francis-ove hidroturbine. U svrhe izrade numeričke simulacije korišten je softver Ansys Fluent. Rezultati simulacije predstavljeni su kroz grafičke prikaze koji uključuju konture tlaka, prikaze brzinskih kontura i strujnice.

Ključne riječi: kavitacija, vodne turbine, difuzor, numerička analiza, Ansys Fluent

13. ABSTRACT

In this final thesis is offered of existing solutions for reducing or eliminating cavitation in water turbines and explains the basic concepts related to the formation of cavitation. The second part of the task involved creating a computer simulation of fluid flow within the diffuser of a Francis hydro turbine. For the purpose of the numerical simulation, the software Ansys Fluent was used. The simulation results are presented through graphical representations, including pressure contours, velocity contour plots, and streamlines.

Keywords: cavitation, water turbines, diffuser, numerical analysis, Ansys Fluent