

# NUMERIČKA ANALIZA STRUJANJA FLUIDA U SPIRALNOM KUĆIŠTU FRANCISOVE VODNE TURBINE TIP 1

---

Čulinović, Borna

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:190:951985>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-12**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI  
TEHNIČKI FAKULTET

Prijediplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**NUMERIČKA ANALIZA STRUJANJA FLUIDA U SPIRALNOM  
KUĆIŠTU FRANCISOVE VODNE TURBINE TIP 1**

Rijeka, srpanj 2024.

Borna Čulinović  
0069087436

SVEUČILIŠTE U RIJECI  
TEHNIČKI FAKULTET

Prijediplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**NUMERIČKA ANALIZA STRUJANJA FLUIDA U SPIRALNOM  
KUĆIŠTU FRANCISOVE VODNE TURBINE TIP 1**

Mentor: Prof. dr. sc. Zoran Čarija

Rijeka, srpanj 2024.

Borna Čulinović  
0069087436

Rijeka, 13. ožujka 2023.

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

## ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Borna Čulinović (0069087436)**  
Studij: Sveučilišni prijediplomski studij strojarstva

Zadatak: **Numerička analiza strujanja fluida u spiralnom kućištu Francisove vodne turbine tip 1 / Fluid flow numerical analysis in Francis turbine spiral case type 1**

### Opis zadatka:

U radu je potrebno izraditi CAD model spiralnog kućišta Francis turbine za potrebe numeričke simulacije strujanja fluida. Kreiranu geometriju je potrebno diskretizirati mrežom kontrolnih volumena te izračunati i prikazati turbulentni tok nekompresibilnog fluida pri različitim protocima. Software, nacrtnu dokumentaciju i literaturu za izradu rada će osigurati mentor rada.

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

Zadatak uručen pristupniku: 20. ožujka 2023.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:

---

prof. dr. sc. Zoran Čarija

---

izv. prof. dr. sc. Samir Žic

## **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 „Numerička analiza strujanja fluida u spiralnom kućištu Francisove vodne turbine tip 1“ pod mentorstvom prof. dr. sc. Zorana Čarije.

## **ZAHVALA**

Ovim putem bi se zahvalio prof. dr. sc. Zoranu Čariji na njegovoj pomoći i stručnom vodstvu prilikom pisanja ovog završnog rada.

Također se želim zahvaliti v. asist. dr. sc. Ivani Lučin koja mi je uvijek pomogla i bila na raspolaganju prilikom izrade rada.

Želio bih se zahvaliti svojoj obitelji i prijateljima na potpori tokom čitavog studiranja kao i pisanja ovog završnog rada.

# Sadržaj

1. UVOD .....	1
2. TURBOSTROJEVI .....	2
3. VODNE TURBINE .....	4
3.1 Kaplanova turbina .....	4
3.2 Peltonova turbina .....	6
3.3 Francisova turbina .....	8
4. SPIRALA.....	10
5. IZRADA NUMERIČKE SIMULACIJE.....	13
5.1 3D Modeliranje .....	13
5.2 Numerička analiza strujanja fluida .....	17
5.3 Postavke numeričke mreže .....	18
5.4 Postavke simulacije.....	22
6. REZULTATI.....	25
7. ZAKLJUČAK.....	35
8. LITERATURA .....	36
9. POPIS SLIKA.....	37
10. SAŽETAK.....	39

# 1. UVOD

Kroz povijest vodne turbine su postale dokaz ljudske želje da iskoriste energiju. Vodne turbine se razvijaju stoljećima; počevši od starih Grka i Rimljana koji su razvili jednostavan vodni kotač za usitnjavanje zrna, u srednjem vijeku se taj kotač dalje razvijao za preradu raznih materijala te se taj dizajn tijekom godina dalje razvijao i usavršavao. U današnje vrijeme se susrećemo s klimatskim promjenama te se okrećemo održivim izvorima energije. Hidroelektrična postrojenja koriste razne turbinske dizajne kako bi što učinkovitije pretvorili kinetičku energiju vode u električnu. Vodne turbine, kao i ostali oblici održive energije, igraju veliku ulogu u smanjivanju utjecaja fosilnih goriva. Učinkovitost vodnih turbina ovisi o mnogo čimbenika, između kojih se također nalazi i spiralno kućište same turbine. Zadatak spiralnog kućišta vodne turbine je omogućavanje ravnomjernog dovoda fluida do rotora, pretvaranje kinetičke energije u potencijalnu energiju fluida, smanjenje turbulencije kao i održavanje optimalnog tlaka u čitavoj turbini. Te karakteristike se mogu mijenjati ovisno o dizajnu samog spiralnog kućišta. Neke od najpoznatijih vodnih turbina koje sadrže spiralno kućište su Francisova i Kaplanova turbina.

U ovom završnom radu je potrebno izraditi CAD model spiralnog kućišta Francisove turbine pomoću danih nacrti za potrebu izrade numeričke simulacije strujanja fluida. Kreiranu geometriju je potrebno diskretizirati mrežom kontrolnih volumena te izračunati i prikazati turbulentni tok nekompresibilnog fluida pri različitim protocima.

U sljedećem poglavlju dan je općenit uvod o turbostrojevima i njihovim karakteristikama. U trećem poglavlju pobliže su predstavljene vodne turbine te njihove sličnosti i razlike kao i njihove karakteristike. U četvrto poglavlju opisane su karakteristike spirale i njena funkcija nakon čega je opisana izrada geometrije spiralnog kućišta koja će se koristiti za računalnu analizu. U petom poglavlju opisano je stvaranje numeričke mreže, te su opisani koraci definiranja simulacije strujanja fluida. U šestom poglavlju su prikazani rezultati numeričke simulacije, a u završnom poglavlju dan je zaključak provedenog rada.



## 2. TURBOSTROJEVI

Turbostroj je svaki stroj koji pretvorbu energije u rotoru obavlja po Eulerovim zakonima turbostrojeva. To su energetske strojevi s kontinuiranim protokom radnog fluida kroz sustav statorskih i rotorskih lopatica. Pri tom radu lopatice predaju radnom fluidu energiju koju su dobili nekim drugim strojem kao što je crpka ili pumpa, ili fluidu oduzimaju energiju koju zatim pretvaraju u mehanički rad. Stoga, turbostrojevi se dijele s obzirom povećavamo li ili smanjujemo tj. dodajemo ili oduzimamo energiju. [1] S obzirom na tu podjelu turbostrojeve možemo podijeliti na dvije osnovne vrste:

1. Radni strojevi
2. Gonjeni strojevi

Ako radnom fluidu povećavamo energiju govorimo o radnom stroju. U slučaju da radnom fluidu oduzimamo energiju radi se o gonjenom stroju.

Radni mediji može biti stlačiv ili nestlačiv. Turbostrojevi se stoga mogu podijeliti prema vrsti radnog medija:

1. Plin
2. Para
3. Voda

Turbostrojevi se također dijele prema brzini vrtnje rotora, smjeru strujanja fluida, broju parova statorskih i rotorskih lopatica i vrsti energetske pretvorbe.

S obzirom na brzinu vrtnje se dijele na:

1. Brzohodni
2. Sporohodni

S obzirom na smjer strujanja fluida:

1. Radijalni (okomito na os rotacije)
2. Aksijalni (paralelno osi rotacije)
3. Mješoviti

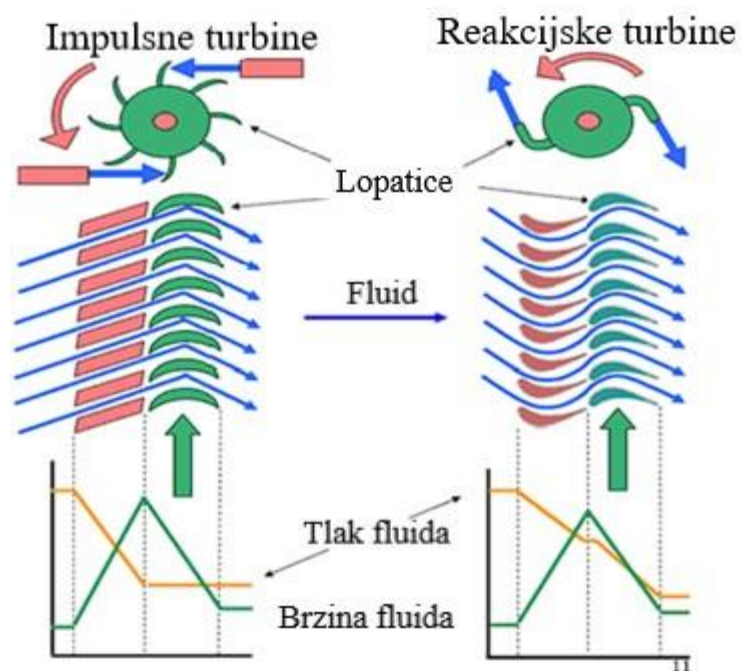
S obzirom na broj parova statorskih i rotorskih lopatica:

1. Jednostupanjski
2. Višestupanjski

Prema pretvorbi energije:

1. Akcijski (Impulsni)
2. Reakcijski

Glavna razlika među ovim turbostrojevima je mjesto gdje dolazi do pada tlaka. Akcijske turbine pretvaraju potencijalnu energiju fluida u statoru u kinetičku energiju koja se u rotoru pretvara u mehanički rad. Reakcijske turbine potencijalnu energiju fluida pretvaraju u kinetičku u statoru kao i u rotoru te se ta energija pretvara u mehanički rad u rotoru. Odnosno, kod akcijskih turbina se pad tlaka odvija samo u statorskim lopaticama dok se kod reakcijskih turbina pad tlaka odvija djelomično u statorskim lopaticama, a djelomično u rotorskim lopaticama. [2]



Slika 2.1 Razlika između akcijske i reakcijske turbine [2]

### **3. VODNE TURBINE**

Vodne turbine su najbitnija komponenta u proizvodnji hidroelektrične energije modernog doba. Ovi strojevi iskorištavaju kinetičku i potencijalnu energiju vode za proizvodnju mehaničke, a zatim tu mehaničku u električnu energiju s pomoću električnog generatora. Konstrukcija se sastoji od kućišta, statorskih lopatica, i turbine (rotora). Dijelovi hidrauličkog turbostroja se projektiraju za zadane radne uvjete kao što su: protok, specifična snaga i broj okretaja. Kod reakcijskih tj. pretlačnih turbina zakretni moment rotora je posljedica sile koja je posljedica promjene količine gibanja, Coriolisove sile. Reakcijske turbine mogu biti radijalne, aksijalne, dijagonalne i radijalno-aksijalne. Kod akcijske turbine zakretni moment rotora nastaje uslijed promjene količine gibanja zbog skretanja mlaza u rotor. Ove turbine su uglavnom tangencijalne. Ovisno o potrebi dizajn turbina se mijenja.[4]

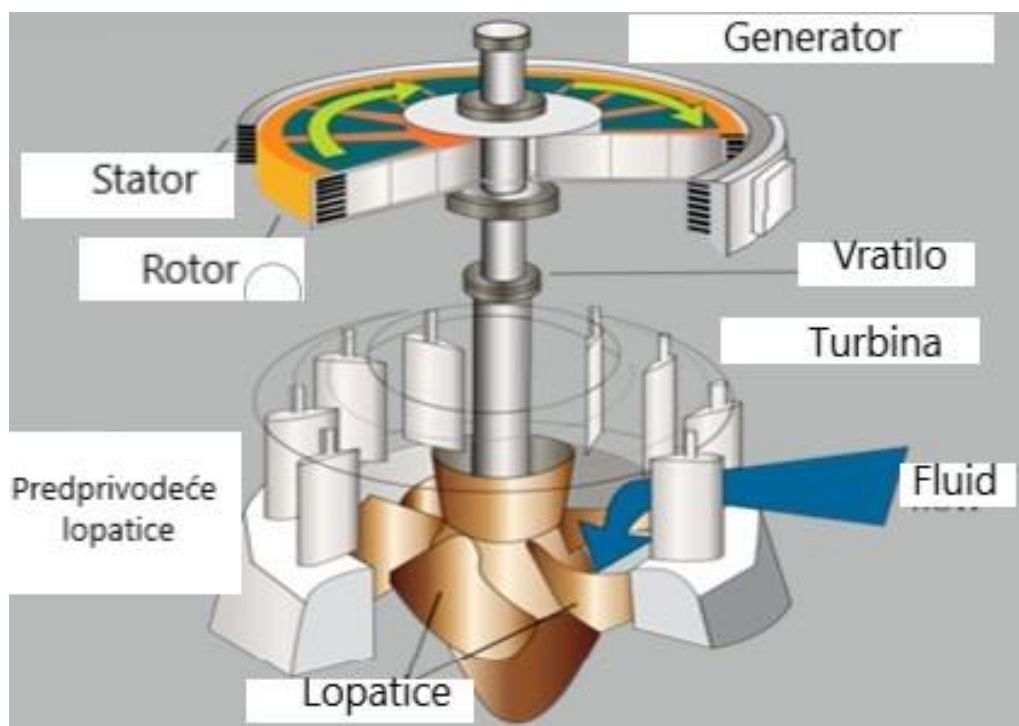
S vremenom su se razvijale različite vrste vodnih turbina ovisno o raznim energetske i okolišnim čimbenicima. Najznačajnijih vrste vodnih turbina su:

1. Kaplanova turbina
2. Peltonova turbina
3. Francisova turbina

#### **3.1 Kaplanova turbina**

Kaplanova turbina (slika 3.1), nazvana po Austrijskom izumitelju Viktoru Kaplanu, se koristi diljem svijeta radi svoje iskoristivosti i prilagodljivosti. Ova turbina se koristi u područjima malih padova te velikih protoka vode. Kaplanove turbine su aksijalne turbine što znači da fluid teče paralelno s osi rotacije rotora te se koristi u područjima pada do 70 m te može razviti snagu do 250 MW. Svrstavaju se u brzohodne turbine budući da im je specifični broj okretaja od 450 do 1200

okr/min. Osnovni dijelovi ovih turbina su rotorske lopatice, glavčina s konusnom kapom, vratilo, statorske lopatice, regulacijske lopatice, spirala i difuzor.[6]



Slika 3.1 Prikaz Kaplanove turbine s generatorom [6]

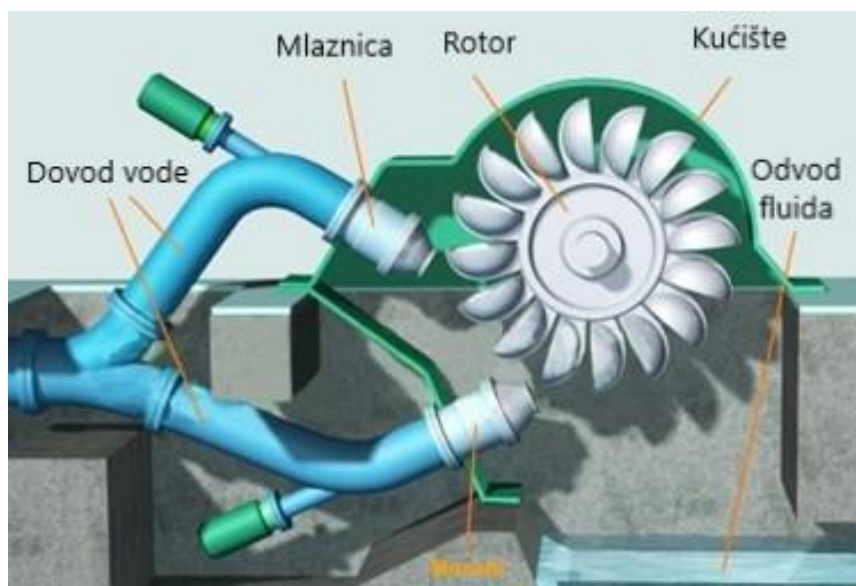
Ovakav dizajn omogućava iskorištavanje vodne energije primarno reakcijskim djelovanjem turbine (potencijalna energija fluida se u statoru pretvara u kinetičku, a kinetička se energija u rotoru pretvara u mehanički rad). Voda teče paralelno osi rotacije rotora te prolazi kroz turbinu prenoseći energiju na lopatice rotora što uzrokuje njihovu rotaciju. Jedno od svojstava po kojem je ova turbina karakteristična su njene prilagodljive lopatice koje mogu namjestiti za različite jačine protoka i padova kako bi omogućile optimalan tok fluida u turbinu. Ta prilagodljivost osigurava maksimalnu učinkovitost ove turbine čak i kod promjenjivog protoka radnog fluida. Iskoristivost ove turbine je veoma visoka (oko 90%) te se radi toga koristi u raznim postrojenjima diljem svijeta.[6]



Slika 3.2 Rotor Kaplanove turbine [18]

### 3.2 Peltonova turbina

Ova turbina, je impulsna turbina nazvana po Američkom inženjeru L. A. Pelton. Dovodi vodu na rotor tangencijalno s pomoću tlačnih mlaznica, smješten u kućištu turbine, koje velikom brzinom izbacuju radni fluid koji udara u rotorske lopatice na koje djeluje aktivna sila te izaziva moment te pokreće rotor. Najveća iskoristivost se dobiva kada se rotor vrti obodnom brzinom tj kada se rotor vrti nešto manjom brzinom od brzine mlaza fluida.[7]



Slika 3.3 Primjer Peltonove turbine [19]

Peltonova turbina se ovisno o količini raspoloživog radnog fluida gradi s jednom ili višezlaznicom. Turbine s jednom ili dvije mlaznice sadrže vodoravno vratilo, dok turbine s tri ili više mlaznica imaju uspravno vratilo. Radi vrlo velikih brzina vode tj. Radnog fluida, lopatice Peltonove turbine (slika 3.4) su „školjkastog“ oblika jer moraju biti hidrodinamički optimalne konstrukcije. Također se vrh lopatice oblikuje izrezom jer je nekoliko lopatice istodobno u dodiru s mlaznicom dok središnji dio lopatice dijeli mlaz na dva jednaka dijela. [7]



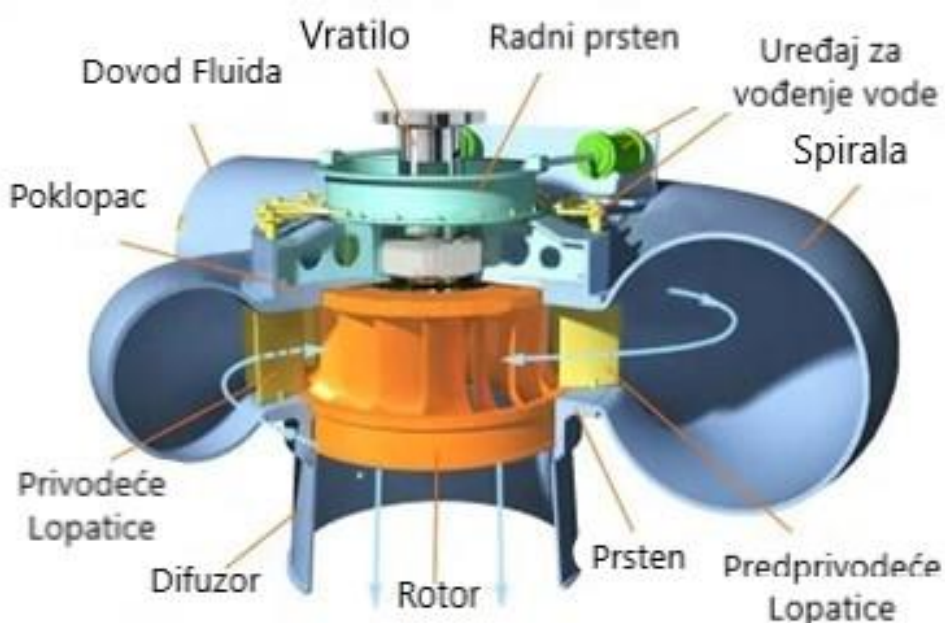
*Slika 3.4 Lopatice Peltonove turbine [20]*

Velike brzine strujanja u mlaznici i na njezinu izlazu uzrokuju znatne hidrodinamičke gubitke pa se velike turbine projektiraju s promjerom mlaza većim od 55 mm. Specifična vrtnja Peltonovih turbina je relativno malena, grade u područjima velikih padova (od 250 do 2000 m), male protoke te razvija snage do 250 MW. Dizajnirane su na način da je jednostavno kontrolirati izlaznu snagu što ih čini prikladnim za uvjete s promjenjivim protokom fluida. [7]

### 3.3 Francisova turbina

Francisove turbine, nazvane po američkom inženjeru J. B. Francis, predstavljaju vrhunac hidroenergetske tehnologije radi svoje svestranosti i učinkovitosti u pretvaranju kinetičke energije fluida u mehaničku energiju. Ove turbine su poznate po svojoj sposobnosti rada u raznim uvjetima protoka i pada fluida. Francisove turbine su reakcijske turbine što znači da koriste i kinetičku energiju fluida kao i njegovu tlačnu energiju. [8]

Osnovni dijelovi ove turbine su: spirala, predprivodeće lopatice, privodeće lopatice, rotor i difuzor. Rotor se sastoji od niza zakrivljenih lopatica postavljenih na središnju os spiralnog kućišta.



Slika 3.5 Primjer Francisove Turbine [10]

Fluid se dovodi tlačnim cjevovodom, prolazi kroz spiralu turbine te dolazi do rotora u koji ulazi radijalno, a izlazi aksijalno. Predprivodeće i privodeće lopatice služe kako bi pretvorili jedan dio tlačne energije u kinetičku energiju. Predprivodeće lopatice su stacionarne i usmjeravaju tok fluida prema rotoru. Privodeće lopatice služe za regulaciju toka fluida tj. smanjujemo ili povećavamo snagu turbine po potrebi. Također s pomoću privodećih lopatica kontroliramo kut ulaza fluida u rotor (Slika 3.6), dakle privodeće lopatice omogućuju optimalan tok fluida kroz rotor. [9]



Zatvorene Predprivodeće  
Lopaticice

Otvorene Predprivodeće  
Lopaticice

*Slika 3.6 Prikaz regulacije protoka pomoću privodećih lopatica [11]*

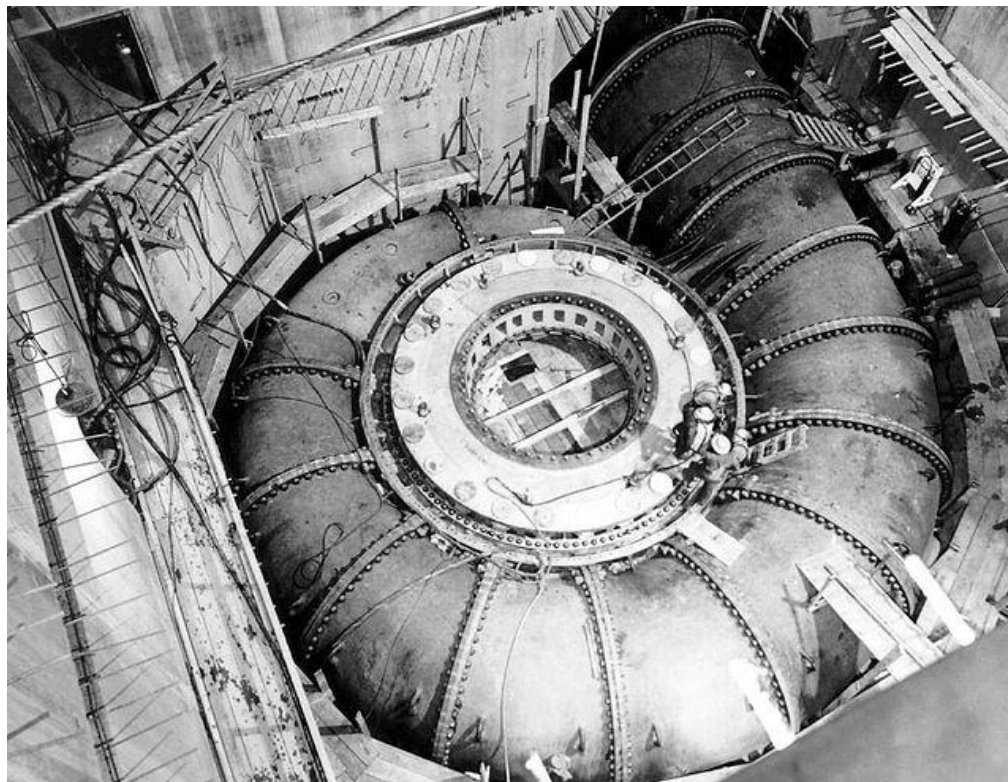


*Slika 3.7 Rotor Francisove turbine [12]*



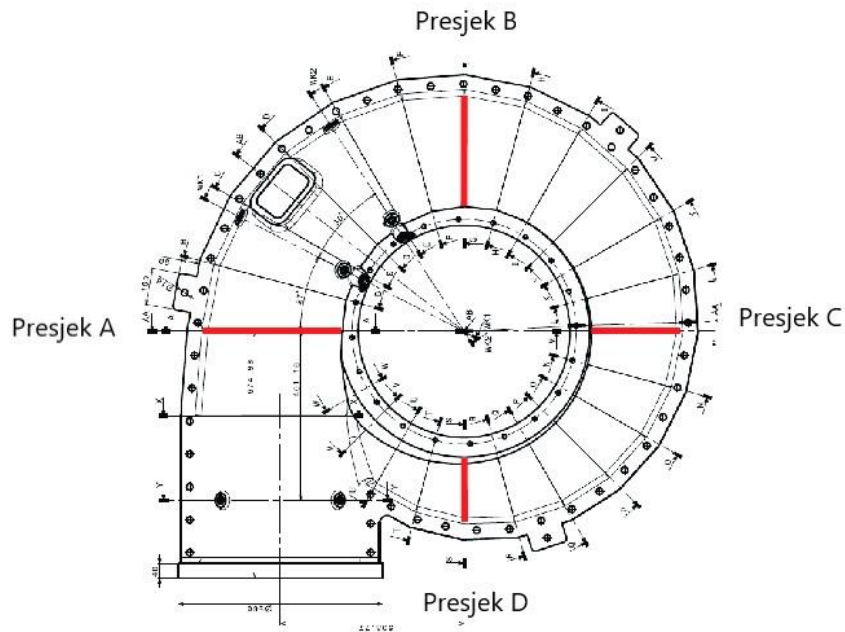
## 4. SPIRALA

Spirala, odnosno spiralni dovod je dio turbine koji ravnomjerno raspoređuje vodu po obodu turbine prije nego uđe u rotor turbine. Tim radom spirala omogućuje jednoliku raspodjelu opterećenja i sprječava vibracije ili neželjene sile. Spirala može biti izrađena od lima, betona, lijevanog željeza ili njihove kombinacije ali najčešće je napravljena iz čelika. [16]



*Slika 4.1 Spirala Francisove turbine [9]*

Poprečni presjek spiralnog kućišta može biti kružni, eliptični, trapezni ili pravokutni. Kružni poprečni presjek spirale, ujedno i najzastupljeniji, je najveći na ulazu te se postepeno smanjuje kako se približava kraju spirale gdje postaje eliptičnog oblika. Trapezna izvedba može biti efikasnija u određenim uvjetima rada, međutim proizvodnja je mnogo kompliciranija. Pravokutne izvedbe su najrjeđe, ali se mogu koristiti u izvedbama ograničenog prostora. [14]



Slika 4.2 Presjeci spiralnog kućišta turbine [17]

Pravilnom konstrukcijom spiralnog kućišta osigurava se jednolika distribucija vode kroz čitavu turbinu. Vrste spirala se odabiru prema raspoloživom padu fluida i snazi i veličini turbine, protoku fluida i slično. [13]

Spirala mora biti projektirana tako da poštuje određene uvjete:

1. tok na izlaznom presjeku mora biti što bliži potencijalnom toku
2. radijalne presjeke spirale dimenzionirani tako da je protok ravnomjerno raspoređen po obodu
3. tok na izlaznom presjeku mora biti osnosimetričan

Veličina poprečnog presjeka se računa prema formuli 4.1:

$$b = 2 * \sqrt{\delta^2 - (r - a)^2} \quad (4.1)$$

Protok kroz meridijalni presjek na određenom mjestu se računa prema formuli 4.2:

$$Q_\varphi = \frac{Q \cdot \varphi}{2\pi} \quad (4.2)$$

Gdje je:

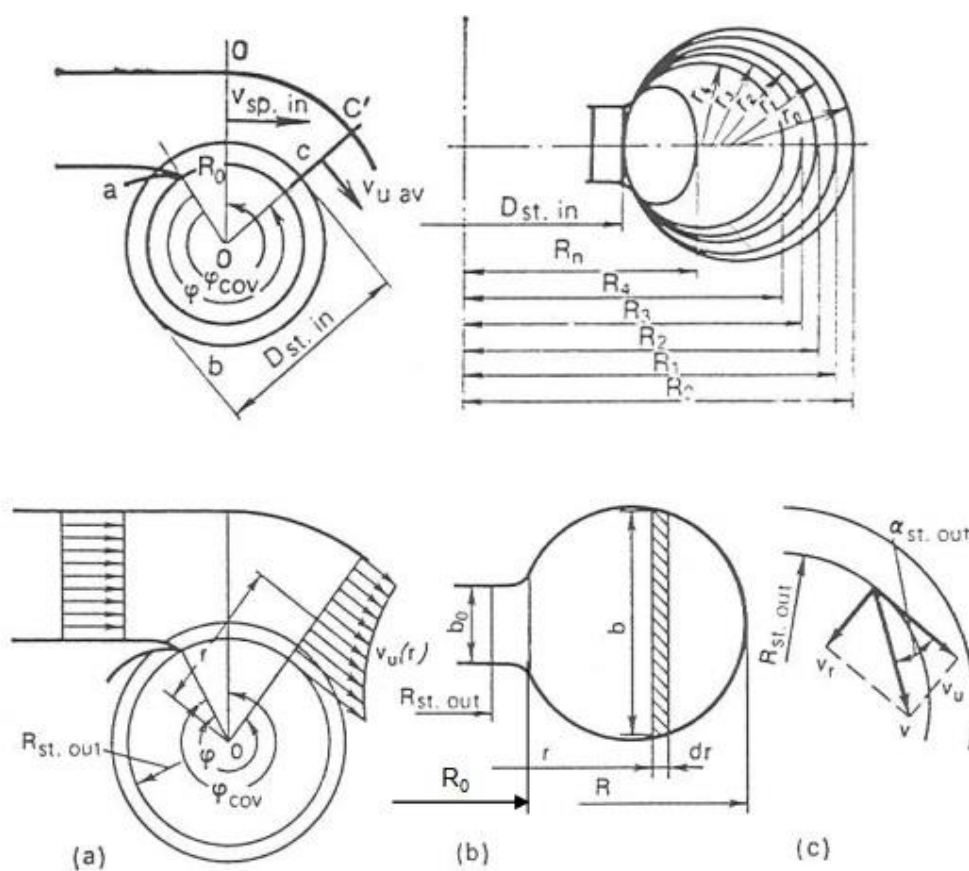
a- položaj središta poprečnog presjeka od osi stroja [m]

b- visina elementarne površine na mjestu r [m]

$\delta$ - polumjer promatranog kružnog poprečnog presjeka [m]

$Q_\varphi$ - protok kroz meridijalni presjek na mjestu [ $m^3/s$ ]

$\varphi$ - kut mjereno od kraja spirale [Rad]



Slika 4.3 Karakteristični presjeci i veličine koje se koriste za proračun promjera poprečnog presjeka spirale [13]

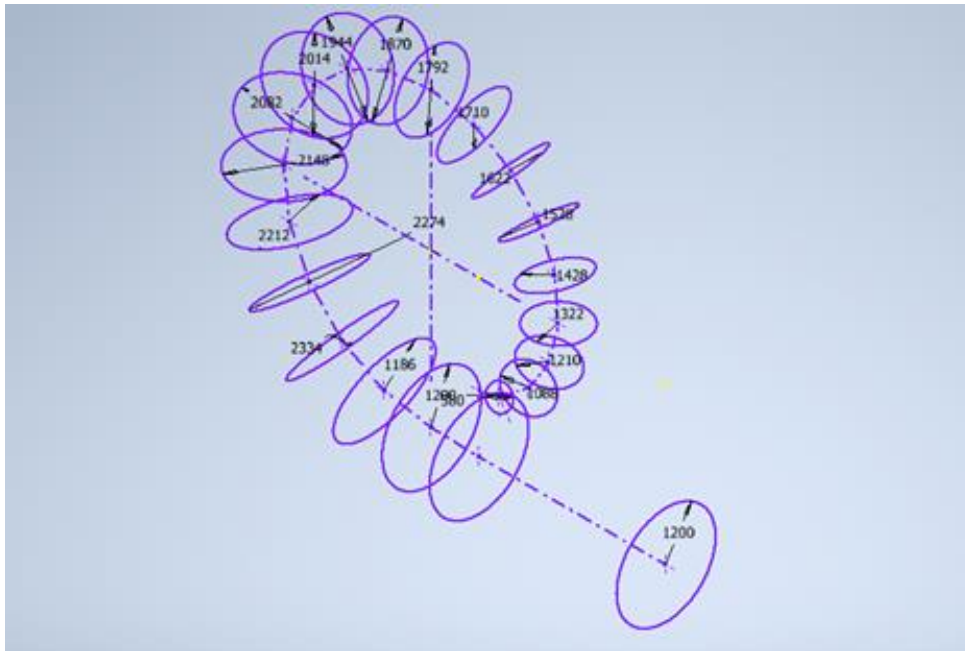
## 5. IZRADA NUMERIČKE SIMULACIJE

### 5.1 3D Modeliranje

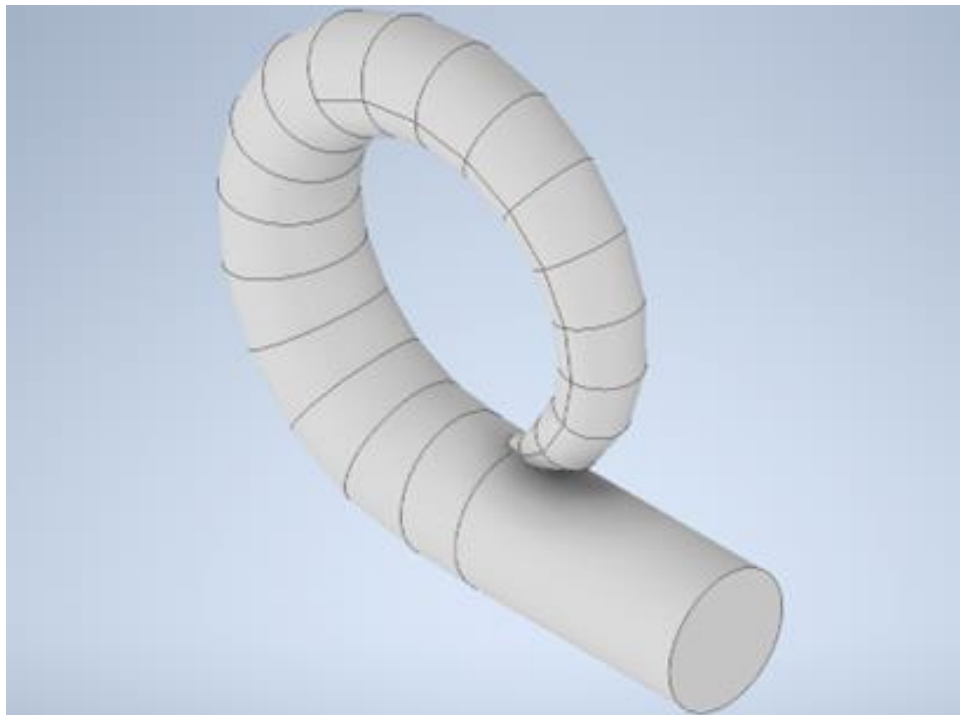
Za stvaranje numeričke analize strujanja fluida potrebno je prvo napraviti određenu geometriju, tj. 3D ili 2D model kojim opisujemo prostor kojim se fluid kreće. U ovom slučaju mora se, iz danih nacrti, napraviti 3D model spiralnog kućišta Francisove turbine, odnosno potrebno je napraviti geometriju fluida tj. prostor kojim fluid zapravo teče. Ta geometrija se može napraviti u bilo kojem od software-a koji služe za 3D modeliranje. U ovom slučaju odabran je program „Autodesk Inventor“.

Autodesk Inventor je profesionalni CAD software koji se koristi za dizajniranje, stvaranje simulacija alata, stvaranje 2D i 3D modela i njihove dokumentacije. CAD software, odnosno oblikovanje s pomoću računala služi za konstruiranje, oblikovanje, projektiranje i vizualizaciju kao i potrebnu tehničku dokumentaciju predmeta kojeg želimo napraviti. Ovi programi su zastupljeni u svim područjima tehničke struke kao što su arhitekture, građevinarstva, elektrotehnike, brodogradnje i strojarstva, ali im je svima zajednička mogućnost trodimenzionalnog oblikovanja predmeta s pomoću dužina, krivulja, ploha i ravnina. [21]

Potrebne dimenzije spirale i predprivodećih lopatica dane su u zadanom nacrtu. Turbina se sastoji od 20 specifičnih presjeka. Poprečni presjeci su definirani svakih  $18^\circ$  te se postepeno smanjuju kako se približava kraj spirale kao što se vidi na slikama 5.1 i 5.2.



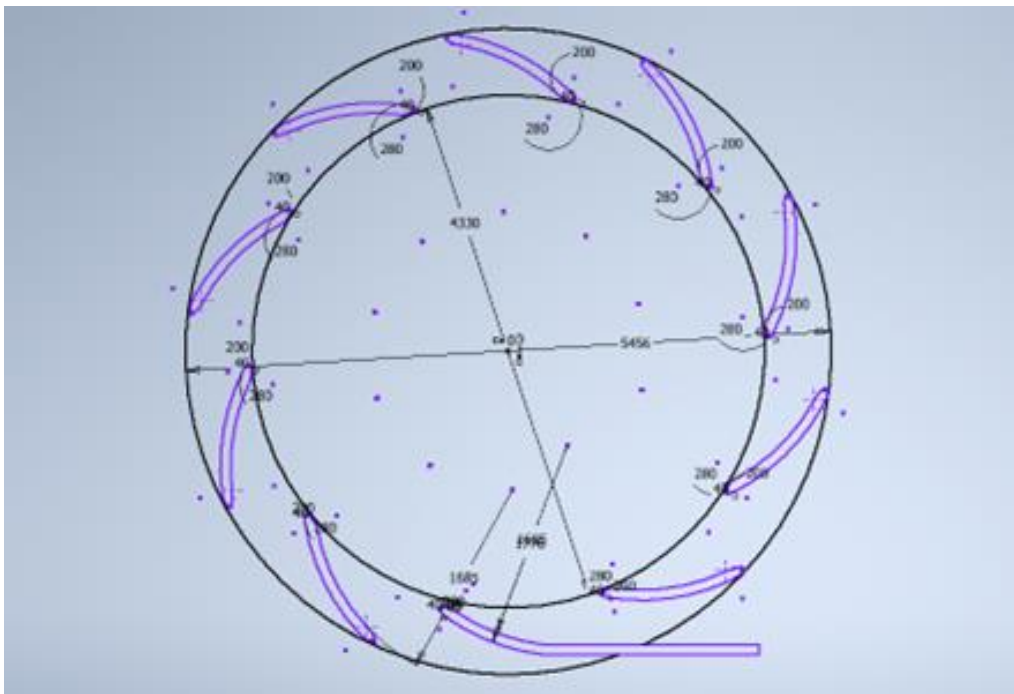
Slika 5.1 Poprečni presjeci spirale



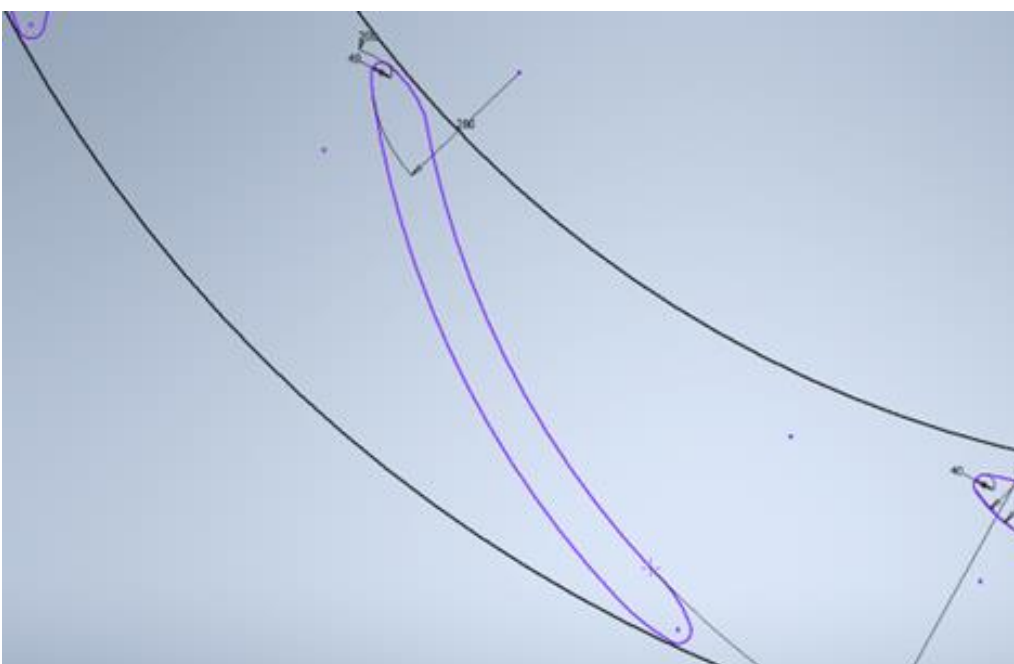
Slika 5.2 3D model spirale

Nakon stvaranja svih presjeka potrebno ih je povezati kako bi se dobio karakterističan oblik spirale koja se traži. Konačan izgled modela spirale vidljiv je na slici 5.2. U svrhu stvaranja modela spiralnog kućišta Francisove turbine potrebno je izraditi „prstena“ u kom se nalaze predprivodeće lopatice. Turbina se sastoji od 10 identičnih predprivodećih lopatica koje su međusobno

razmaknute za  $36^\circ$ . Geometrija izrađena je na temelju dostupne dokumentacije te je profil lopatice uzet iz originalnog nacрта. Konačan izgled prstena s predprivodećim lopaticama je vidljiv na slikama 5.3 i 5.4.

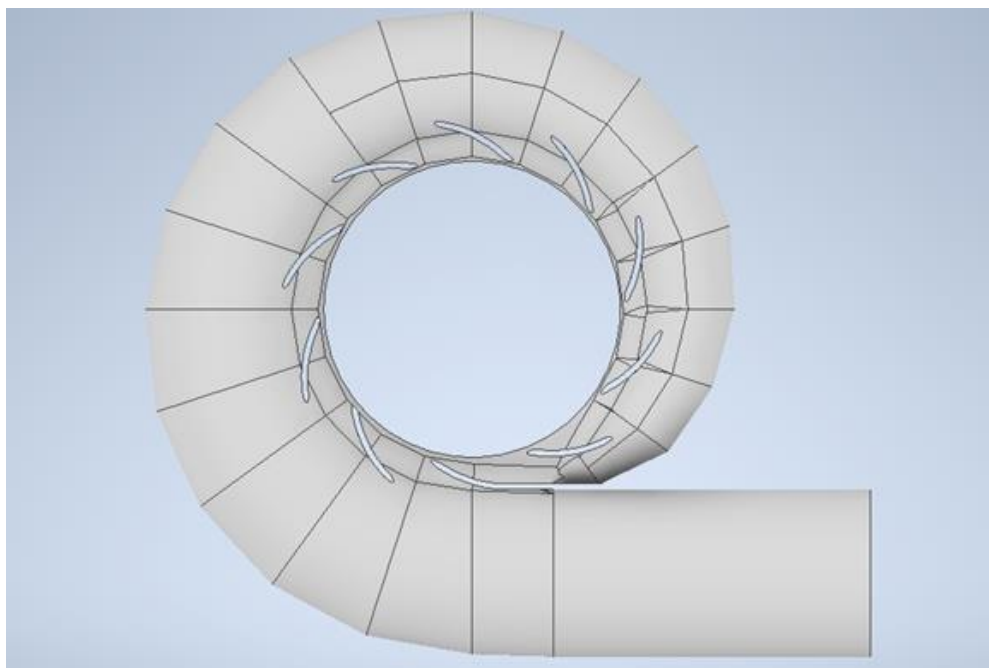


Slika 5.3 Predprivodeće lopatice Francisove turbine

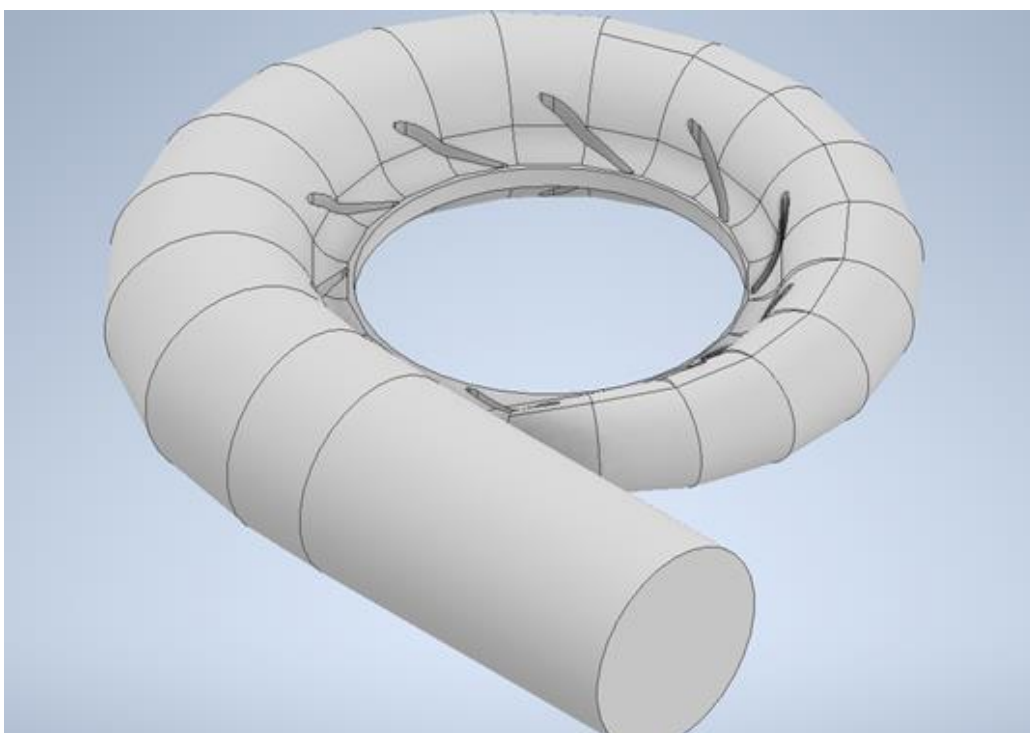


Slika 5.4 Površina jedne predprivodeće lopatice u Inventoru

Na slikama 5.5 i 5.6 se vidi konačan model spiralnog kućišta i prstena s predprivodećim lopaticama u Inventoru.



*Slika 5.5 Završna geometrija spiralnog kućišta i prstena s predprivodećim lopticama*

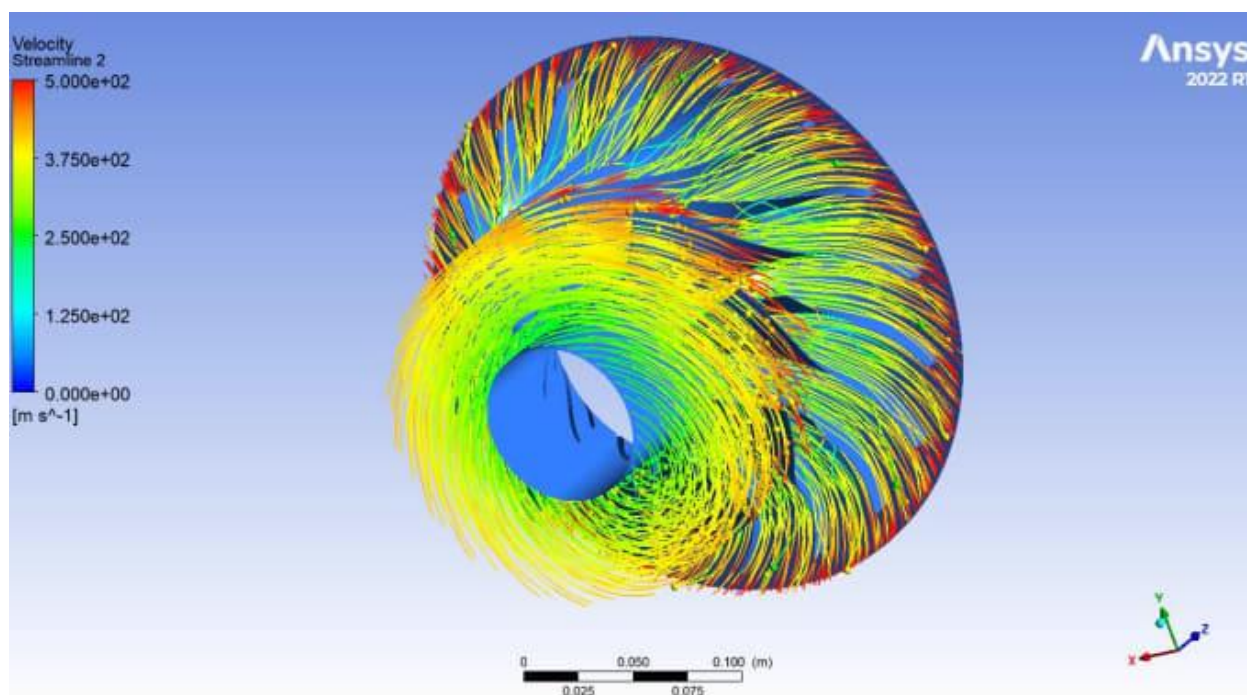


*Slika 5.6 Završna geometrija spiralnog kućišta i prstena s predprivodećim lopticama iz drugog kuta*

## 5.2 Numerička analiza strujanja fluida

Računska dinamika fluida je grana računalne dinamike fluida (eng. Computational Fluid Dynamics- CFD) koja omogućava s pomoću numeričkih metoda rješava jednadžbe koje opisuju kretanje fluida i promjene u brzini, tlaku, gustoći i temperaturi. Numerička analiza se koristi u raznim područjima inženjerstva koji uključuju strujanje fluida kao što su aerodinamika, sustavi grijanja i hlađenja, ventilacije, automobilska industrija, vibracije i termodinamički i kemijski procesi u tekućinama. U strojarstvu se numerička analiza koristi kako bi se s velikom točnošću mogli prikazati rezultati opstrujavanja oko modela, npr. Šasije auta, cjevovoda ili lopatica turbina što je doprinjelo povećanjem performansi i iskoristivosti ispitivanih modela. [22]

Budući da se statika fluida može dovoljno dobro riješiti i analitičkim metodama, Računalna dinamika fluida se koristi za rješavanje dinamike fluida koja je izrazito kompleksna i nepredvidiva, a računalno modeliranje daje uvid u ponašanje fluida tokom gibanja. Cilj CFD simulacija je izrada točnog modela, stvaranje simulacije kako bi se dobio što točniji uvid. [22]



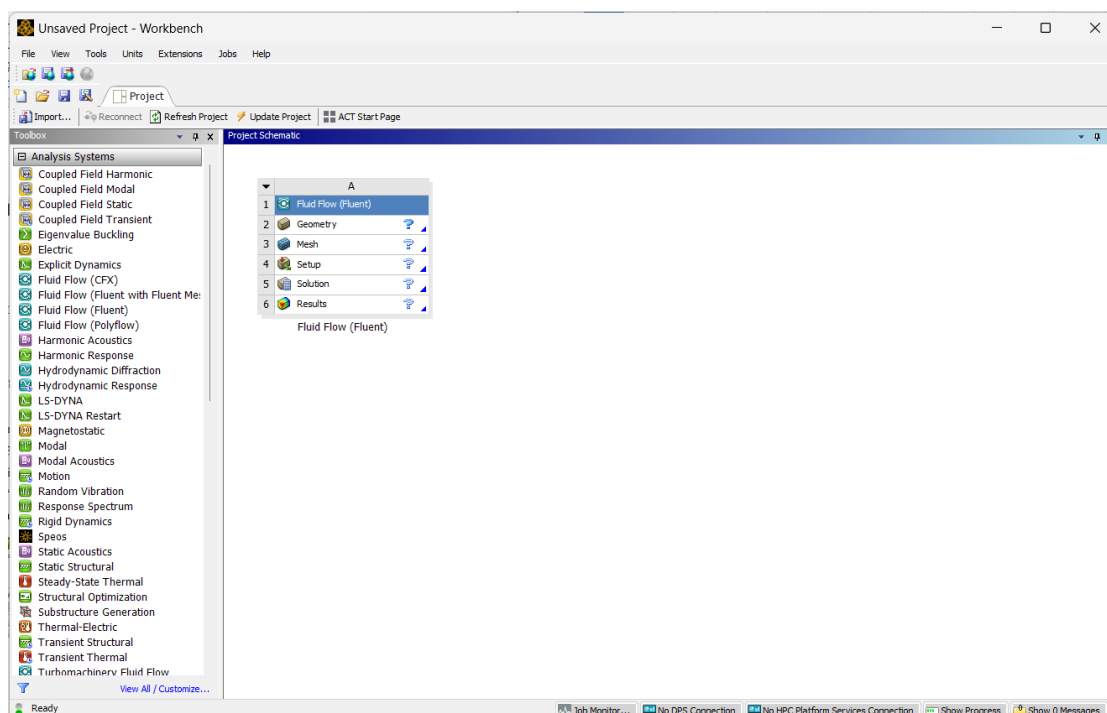
Slika 5.7 Primjer rezultata CFD simulacije [24]

U svrhe stvaranja simulacije toka fluida se koristi Ansys Fluent. Ansys je vodeći software za simulaciju fluida u industriji. Karakterističan je po svojim naprednim mogućnostima fizičkog



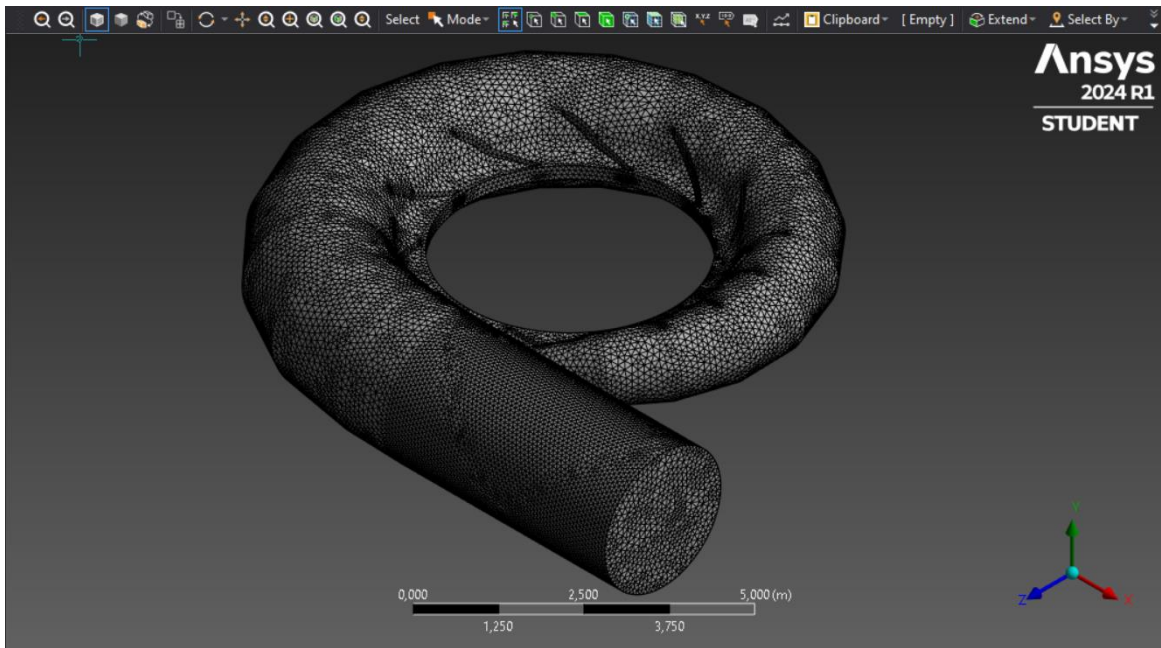
modeliranja i jednom od najvećih točnosti u čitavoj klasi. Ovaj software je dostupan inženjerima, znanstvenicima ali i studentima za stvaranje simulacija te daje uvid u ponašanje fluida bez praktičnog testiranja, odnosno fizički testiranjem prototipa ili stvaranjem zračnih tunela. Simulacije u Ansysu se odvijaju u Ansys Workbenchu unutar kojeg se moraju izmijeniti određene postavke i parametri kako bi se dobili što precizniji rezultati. [23]

### 5.3 Postavke numeričke mreže

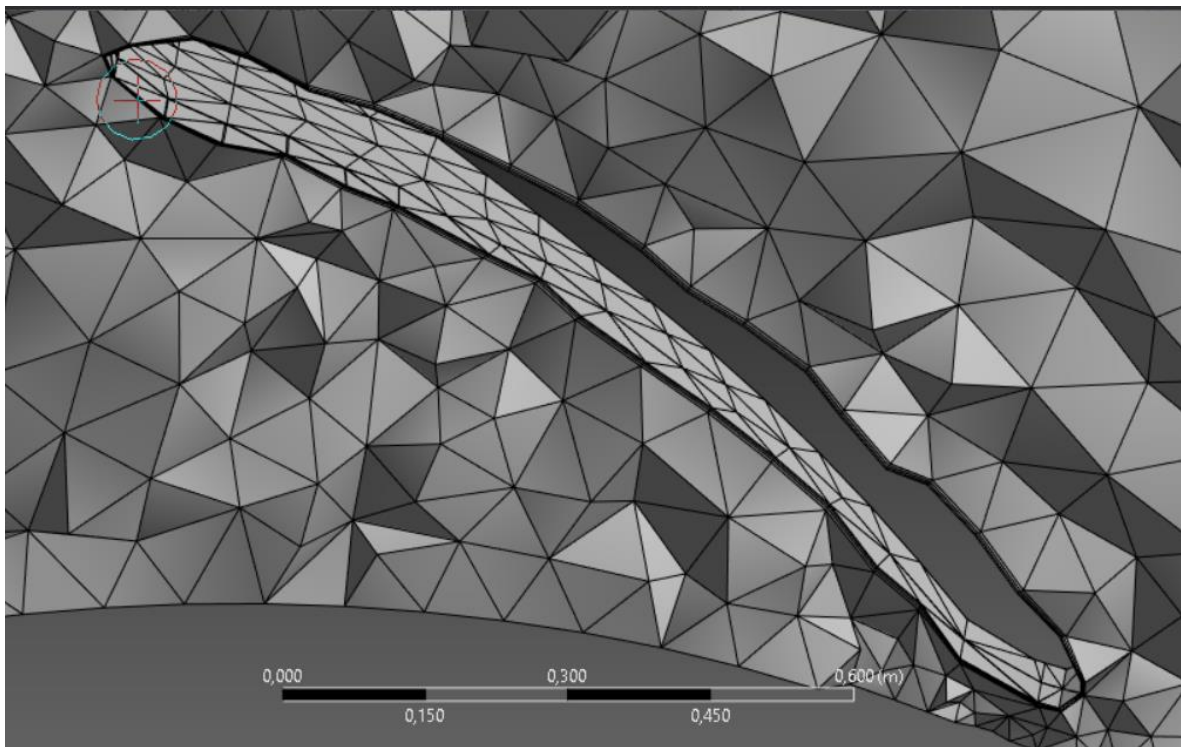


Slika 5.8 Sučelje Ansys Workbencha

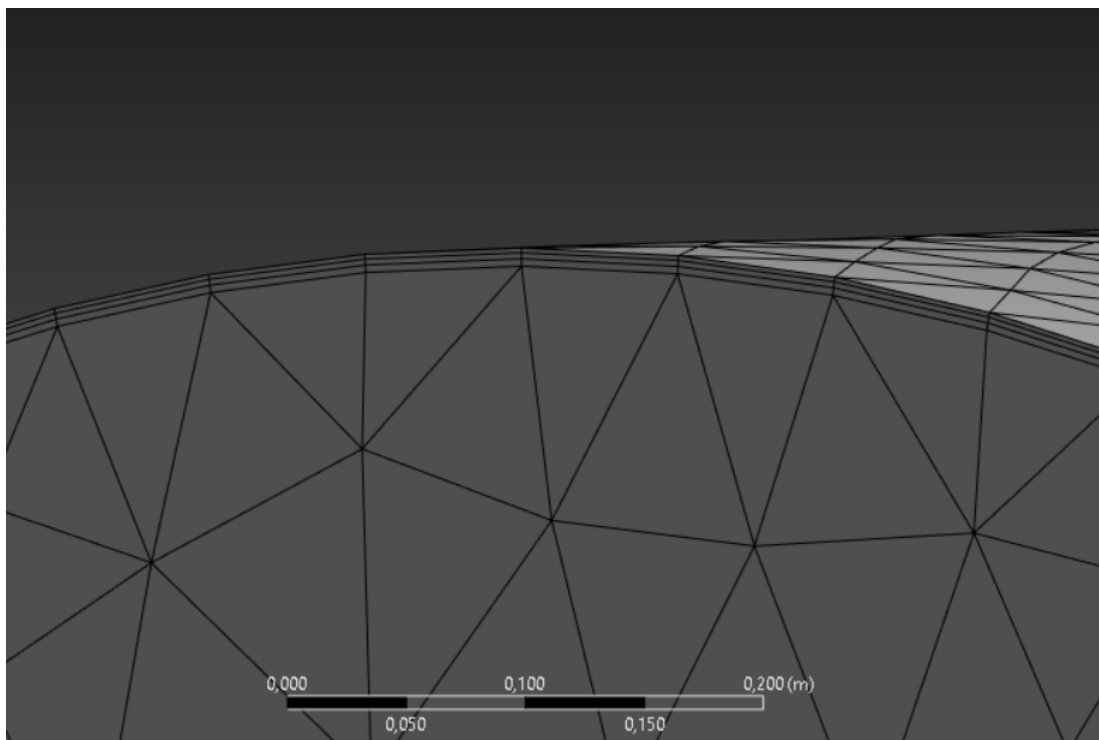
Za kreiranje numeričke mreže se koristi Ansys Meshing koji automatski stvara numeričku mrežu, međutim postavke se moraju prilagoditi kako bi se preciznije opisao 3D model. Stvaranje numeričke mreže je proces u kom se domena dijeli na mnogo manjih podvolumena unutar kojih se rješavaju Navier-Stokes jednadžbe dinamike fluida. Tim procesom se dobivaju rezultati koji opisuju ponašanje fluida dok teče kroz dani volumen. Što je numerička mreža gušća, odnosno ima veći broj elemenata to će biti bolje opisan model, a samim time i simulacija. Kako bi se napravila numerička mreža prvo se geometrija mora dodati u program. Ansys podržava više formata file-ova kao što su .stp, .iges i .stl datoteke. Za potrebe ovog završnog rada se model sprema u obliku „.stp“ te se importira kao vanjska geometrija u software.



*Slika 5.9 Geometrija fluida s numeričkom mrežom*

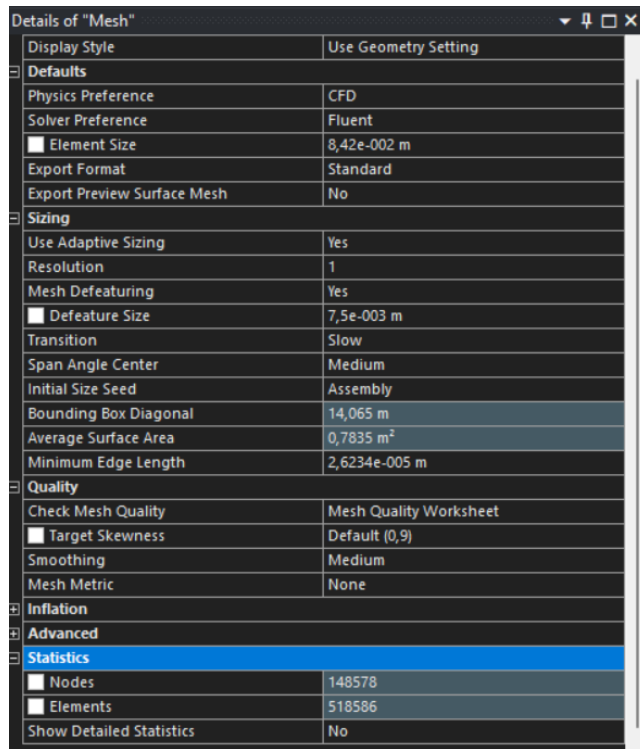


*Slika 5.10 Detalj numeričke mreže oko predprivodeće lopatice s inflacijom*



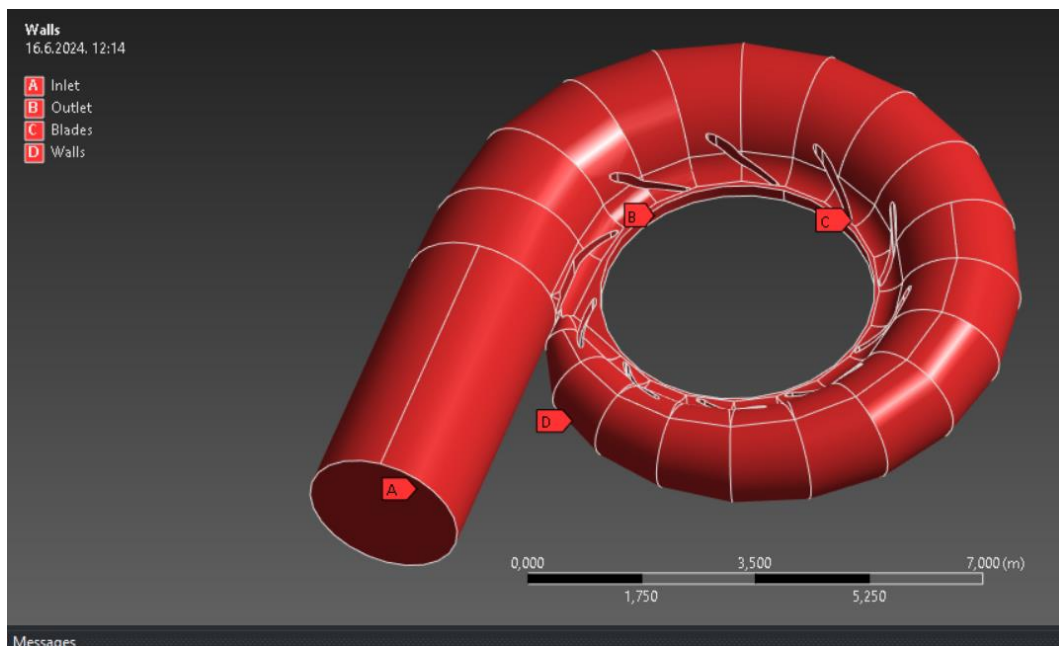
*Slika 5.11 Ulazni presjek s inflacijom*

Ova numerička mreža (slika 5.9) se sastoji od 518 586 elemenata i 148 578 čvorova. Za postizanje ovakve numeričke mreže potrebno je nekoliko izvornih postavki promijeniti i prilagoditi kao što su mijenjanje najveće veličine elemenata, defeaturing. Definirana je veličina elementa u domeni od 0.0842 m, a na zidovima domene definirano je 3 sloja s visinom prve ćelije od 0.002 m.



Slika 5.12 Postavke numeričke mreže

Uz postavke numeričke mreže potrebno je definirati i rubne uvjete kao što su ulaz, izlaz i zidovi kao što se vidi na slici 5.13.

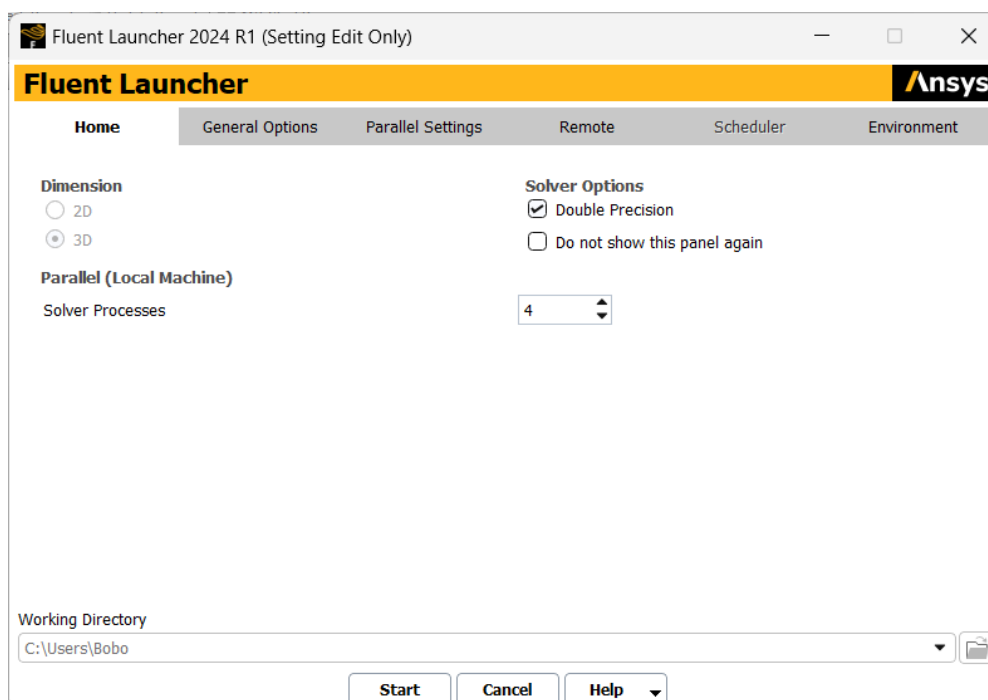


Slika 5.13 Rubni uvjeti

Ulaz u spiralu je definiran kao „A“ odnosno „Inlet“, a izlaz iz spirale u rotor kao „B“ odnosno „Outlet“. Uz ove uvjete još su definirani rubni uvjeti uz stijenke i sve lopatice (C za lopatice, a D za stijenke spirale) na kojima je brzina jednaka 0 m/s što će se vidjeti na rezultatima. Ovim korakom je stvaranja numeričke mreže završeno.

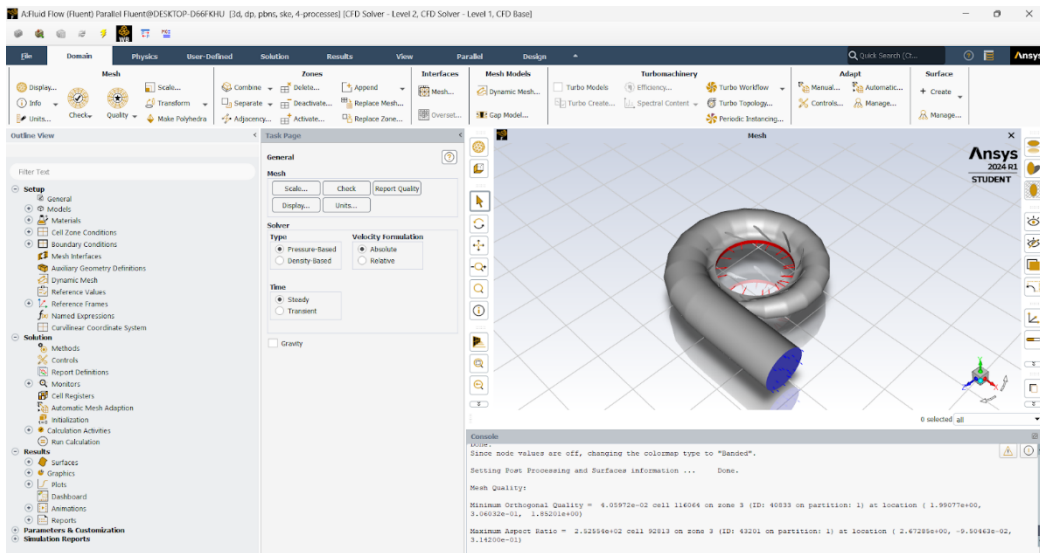
## 5.4 Postavke simulacije

Otvaranjem opcije „Setup“ otvara se skočni prozor (slika 6.11) u kojem odabiremo opcije kao što su „double precision“, odnosno prevedeno „dupla preciznost“. Uz tu opciju se još odabire broj jezgara koje će sudjelovati u računanju. Što je veći broj jezgara uključeno u računanje to će se proces brže odvijati. Taj broj ovisi o broju jezgara s kojima računalo raspolaže pa će samim time ovisiti od računala do računala.



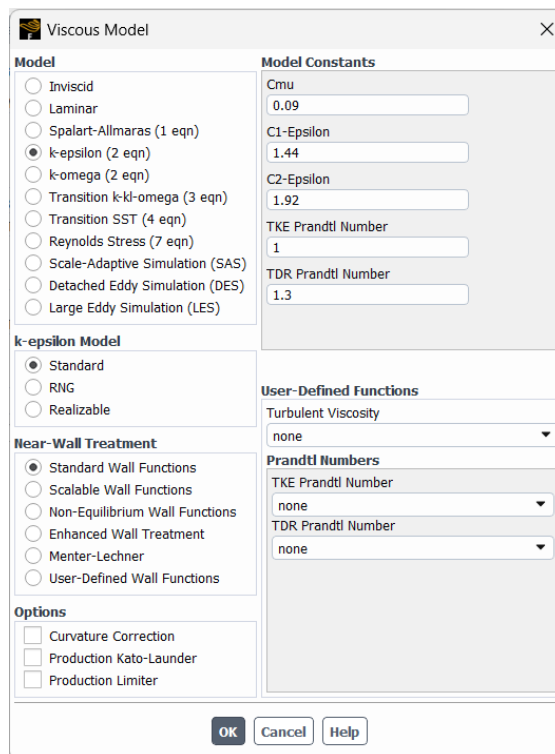
Slika 5.14 Fluent Launcher

Kako bi se dobilo željene rezultate potrebno je definirati odgovarajuće postavke simulacije.



Slika 6.12 Sučelje Fluent-a

Potrebno je odabrati „k-epsilon (2-eqn)“ turbulentni model strujanja fluida. Ovo je najčešći model za stvaranje simulacije srednjih karakteristika protoka za turbulentne uvjete strujanja. Ostale postavke u ovom skočnom prozoru se ostavljaju nepromijenjene.



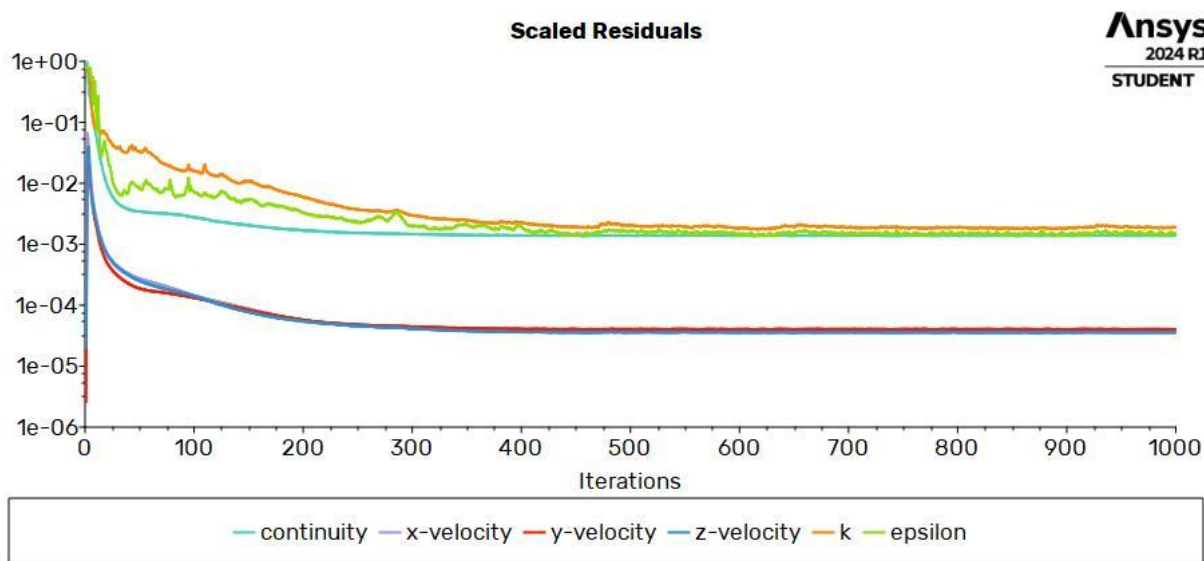
Slika 6.13 Skočni prozor viskoznih modela

Kao radni fluid se odabire voda, a zatim se moraju promijeniti rubni uvjeti. Budući da su se u prethodnom poglavlju već postavili rubni uvjeti Ansys automatski dodjeljuje opcije već definiranim rubnim uvjetima (Inlet, Outlet i Walls). Za ulazni presjek je potrebno odabrati zadani protok od  $60 \text{ m}^3/\text{s}$ , a na zidovima je potrebno odabrati opciju „No slip“ koja definira brzinu na stijenkama lopatica kao  $0 \text{ m/s}$ . Za izlazni presjek se je postavljen atmosferski tlak.

Posljednji korak u stvaranju simulacije je Inicijalizacija. Inicijalizacija dodjeljuje vrijednosti svakoj ćeliji koja služi kao početna pretpostavka za Solver da započne simulaciju. Ovaj korak je veoma bitan te što je početna pretpostavka bliža krajnjem rješenju to će brže rješenje konvergirati. Korištena je opcija „Standard initialisation“ gdje su početne vrijednosti preuzete s „inleta“. Broj iteracija se postavlja na 1000 nakon čega se može pokrenuti proračun. Nakon što svi rezultati konvergiraju rezultati se mogu vizualizirati.

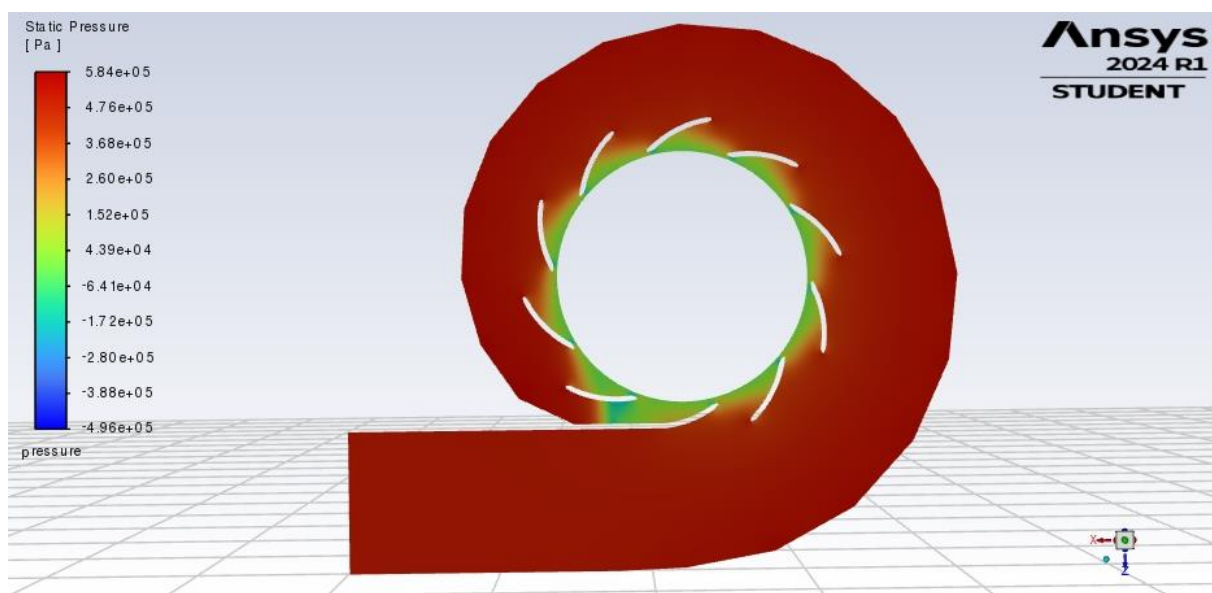
## 6. REZULTATI

Na slici 6.1 prikazan je graf reziduala.



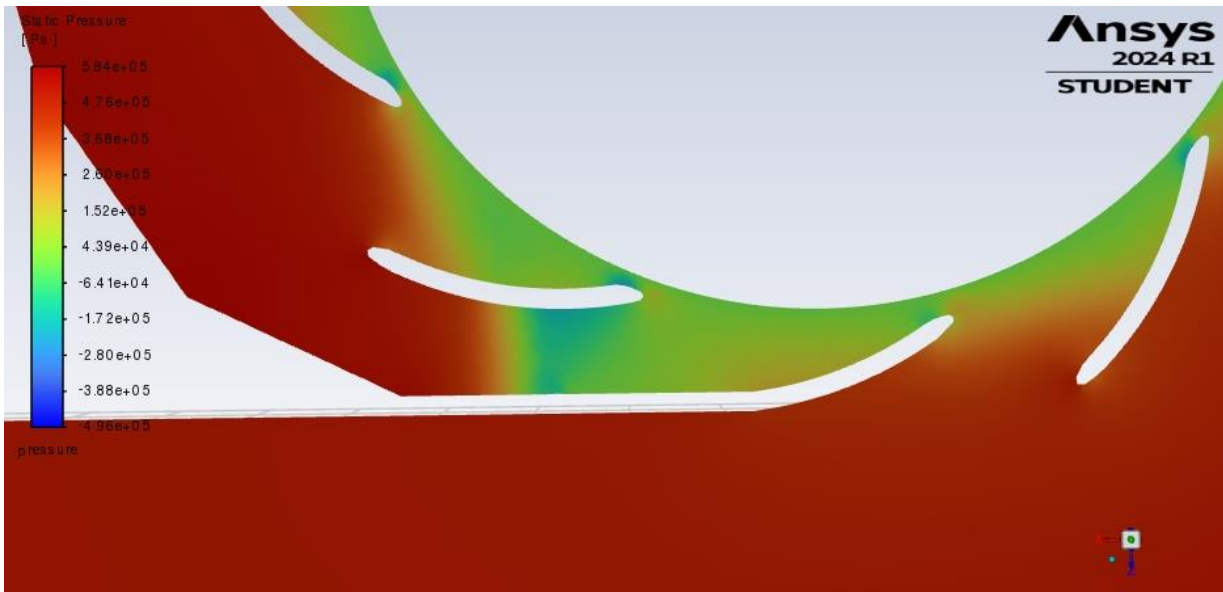
Slika 6.1 Graf reziduala

Prvo se prikazuju rezultati statičkog tlaka, zatim dinamičkog, a na posljepku se prikazuju konture i vektori brzina. Na slici 6.2 prikazane su konture statičkog tlaka kroz spiralu i prsten predprivodećih lopatica za XZ ravninu, a na slici 6.3 prikazan je detalj statičkog tlaka.



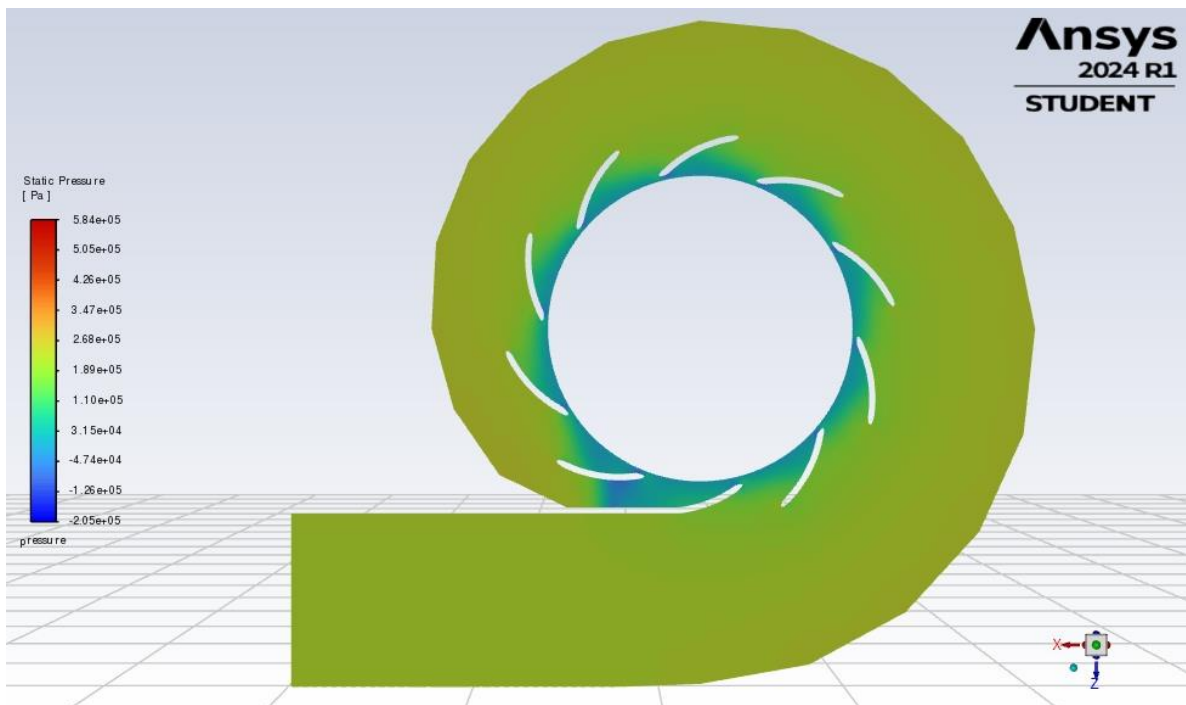
Slika 6.2 Konture statičkog tlaka u XZ ravnini za protok od  $60 \text{ m}^3/\text{s}$



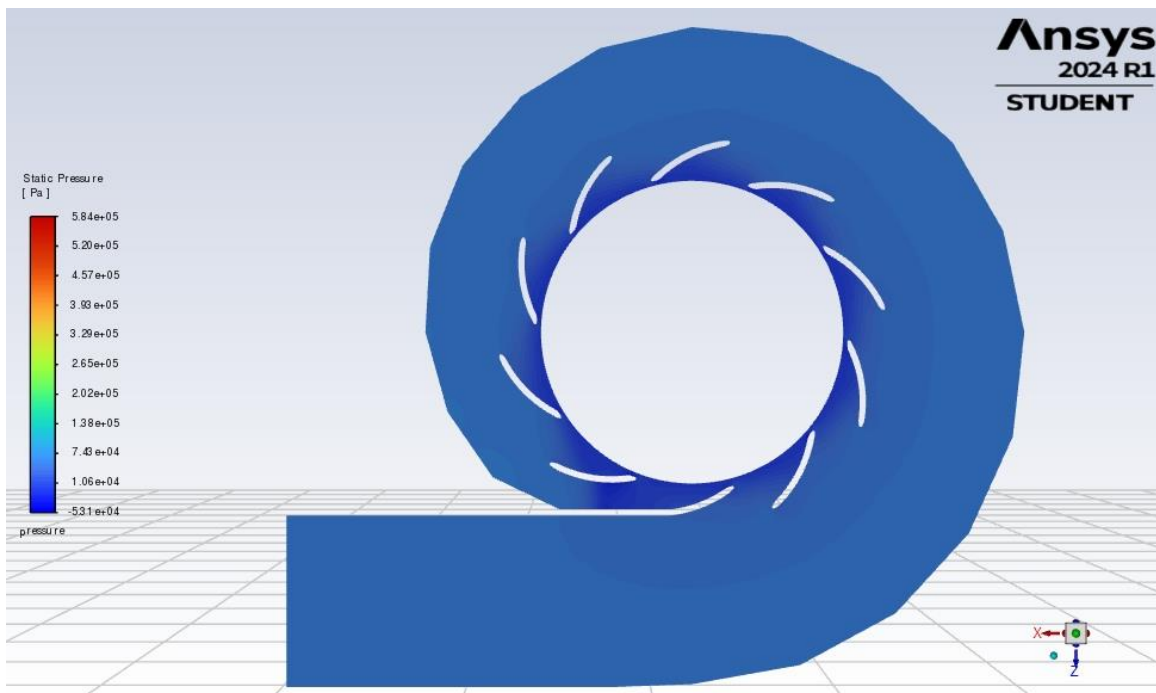


Slika 6.3 Detalj statičkog tlaka oko predprivodeće lopatice za protok od  $60 \text{ m}^3/\text{s}$

Može se primijetiti da se tlak, kako se približava izlazu iz spirale, odnosno području gdje se nalazi rotor postepeno smanjuje. Turbine mogu raditi u rasponu protoka, te je na slikama 6.4 i 6.5 prikazan statički tlak za protok od  $40 \text{ m}^3/\text{s}$  i  $20 \text{ m}^3/\text{s}$ .

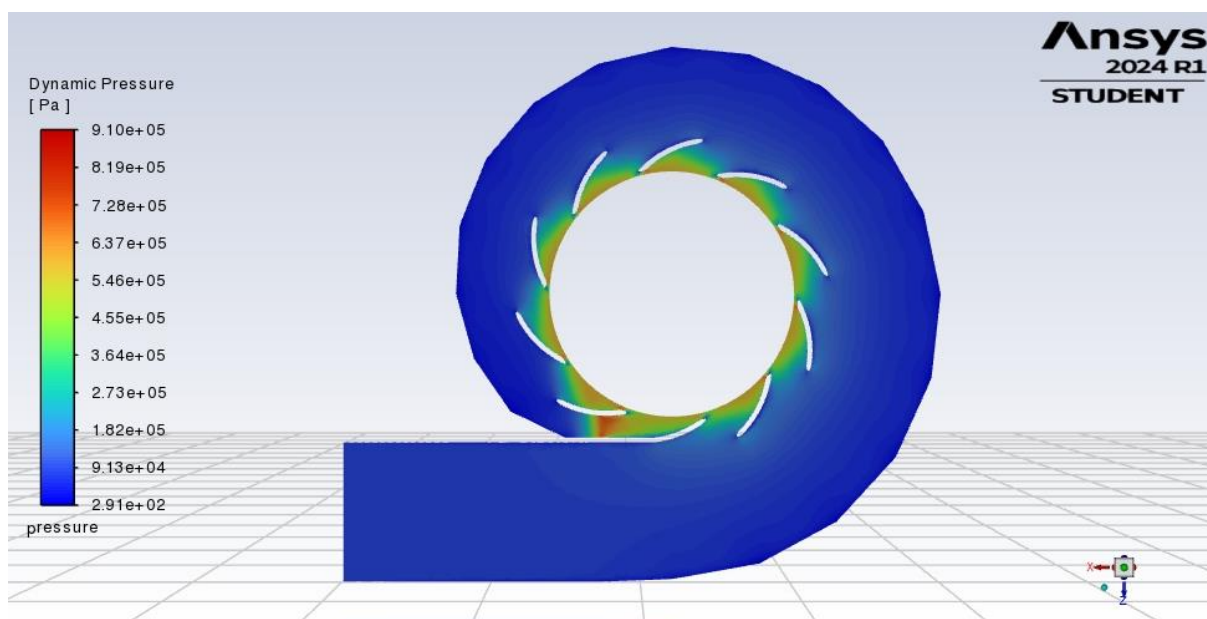


Slika 6.4 Konture statičkog tlaka u XZ ravnini za protok od  $40 \text{ m}^3/\text{s}$

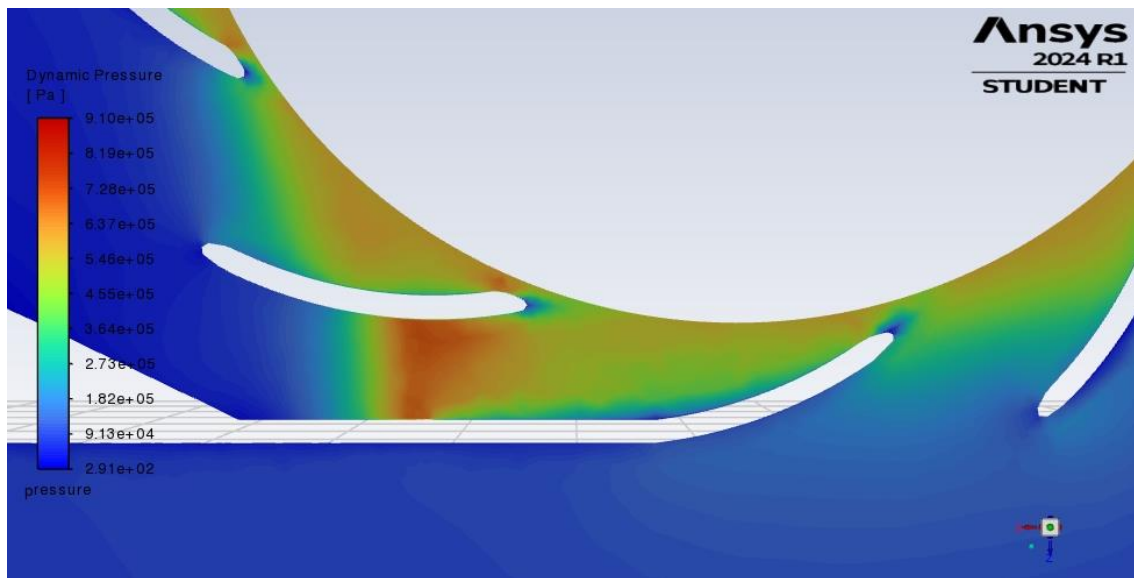


Slika 6.5 Konture statičkog tlaka u XZ ravnini za protok od 20 m<sup>3</sup>/s

Na slici 6.6 prikazane su konture dinamičkog tlaka kroz spiralu i prsten predprivodećih lopatica za XZ ravninu, a na slici 6.3 prikazan je detalj dinamičkog tlaka.



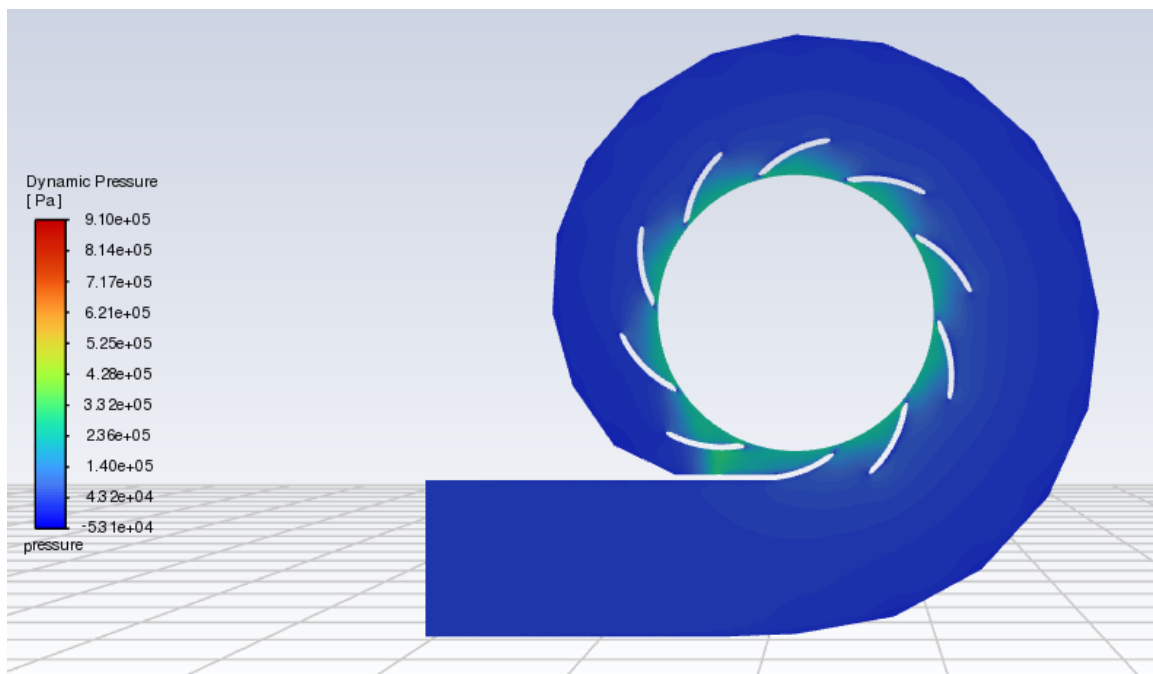
Slika 6.6 Dinamički tlak u XZ ravnini za protok od 60 m<sup>3</sup>/s



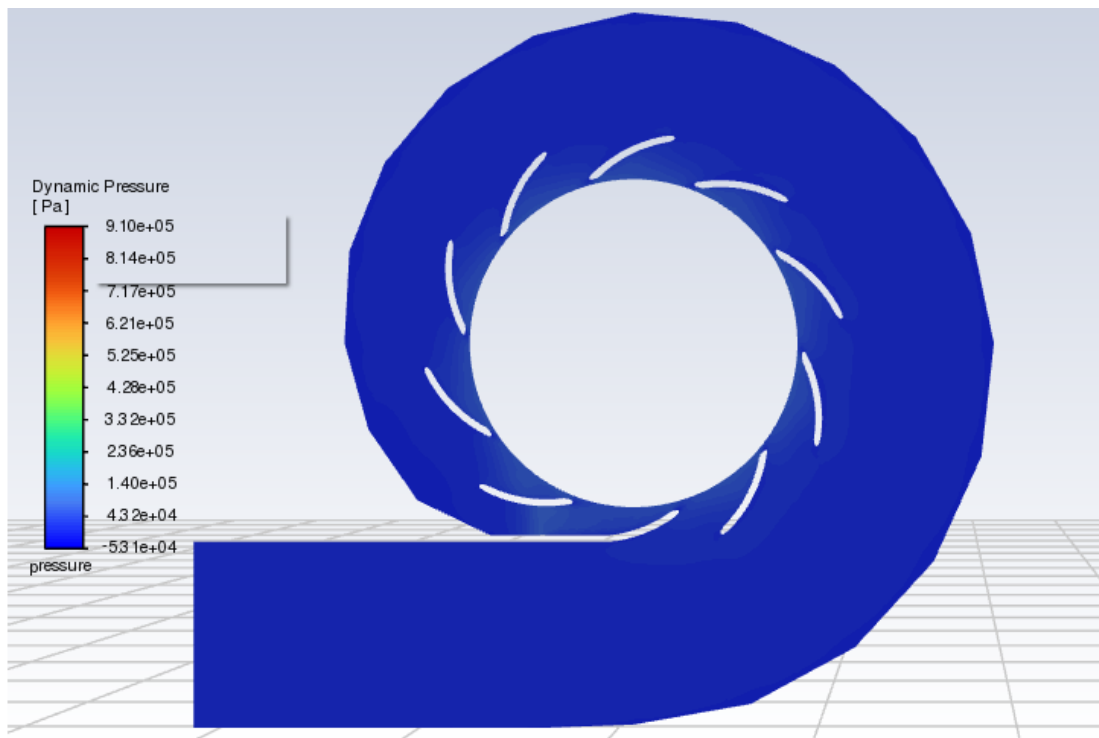
Slika 6.7 Detalj dinamičkog tlaka oko predprivodeće u XZ ravnini za protok od  $60 \text{ m}^3/\text{s}$

Kod dinamičkog tlaka se može primijetiti da dinamički tlak raste u dijelovima gdje fluid ulazi u područje rotora, odnosno „Outlet“

Na slikama 6.8 i 6.9 su prikazani dinamički tlakovi za različite protoke.

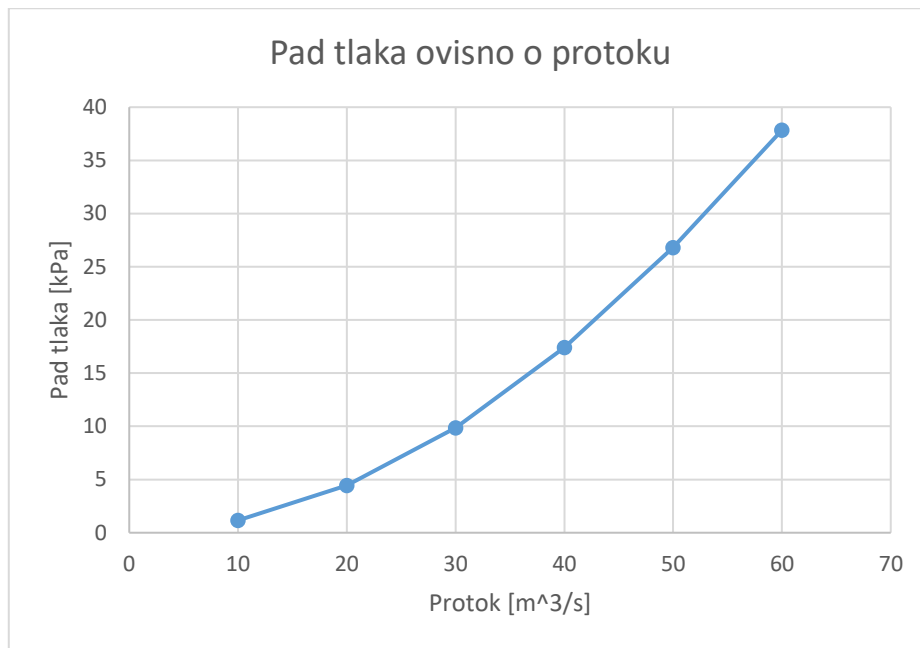


Slika 6.8 Konture dinamičkog tlaka u XZ ravnini za protok od  $40 \text{ m}^3/\text{s}$



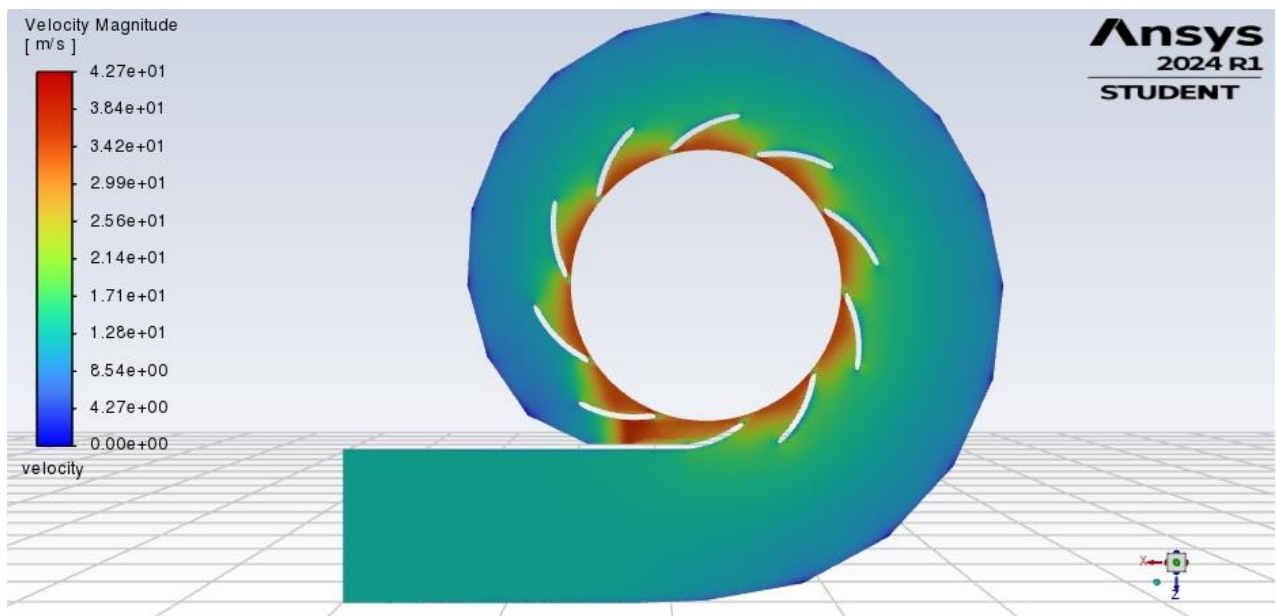
*Slika 6.9 Konture dinamičkog tlaka u XZ ravnini za protok od 20 m<sup>3</sup>/s*

Budući da ova turbina može raditi u rasponu protoka potrebno je odrediti koliko je pad tlaka u određenim rasponima. Pad tlaka se u ovom slučaju računao za protoke od 10 do 60 m<sup>3</sup>/s te se taj pad tlaka računa kao razlika ukupnog tlaka u „Inletu“ i „Outletu“. Potom se proces ponavljaju za svaki od protoka. Dobivene podatke se može prikazati kao graf u kojem se vidi eksponencijalni rast odnosno pad tlaka s obzirom na protok (Slika 6.10).



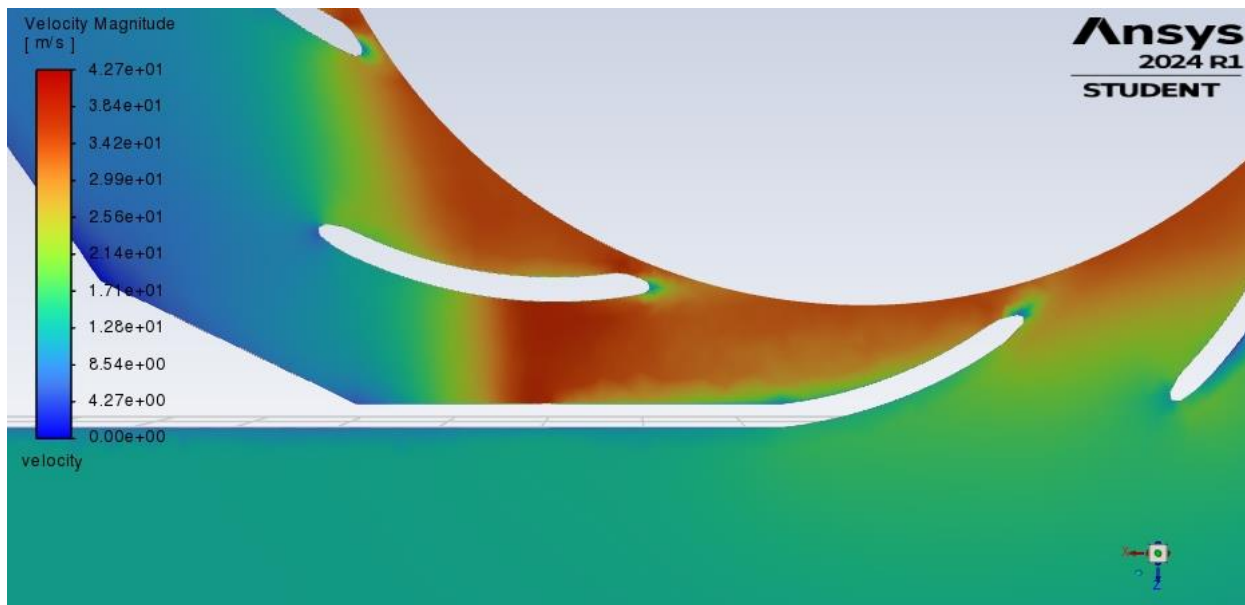
Slika 6.10 Pad tlaka ovisno o protoku

Na slici 6.11 su prikazane konture brzina kroz spiralu i prsten predprivodećih lopatica u XZ ravnnini. Na slici 6.12 prikazan je detalj konture brzina.

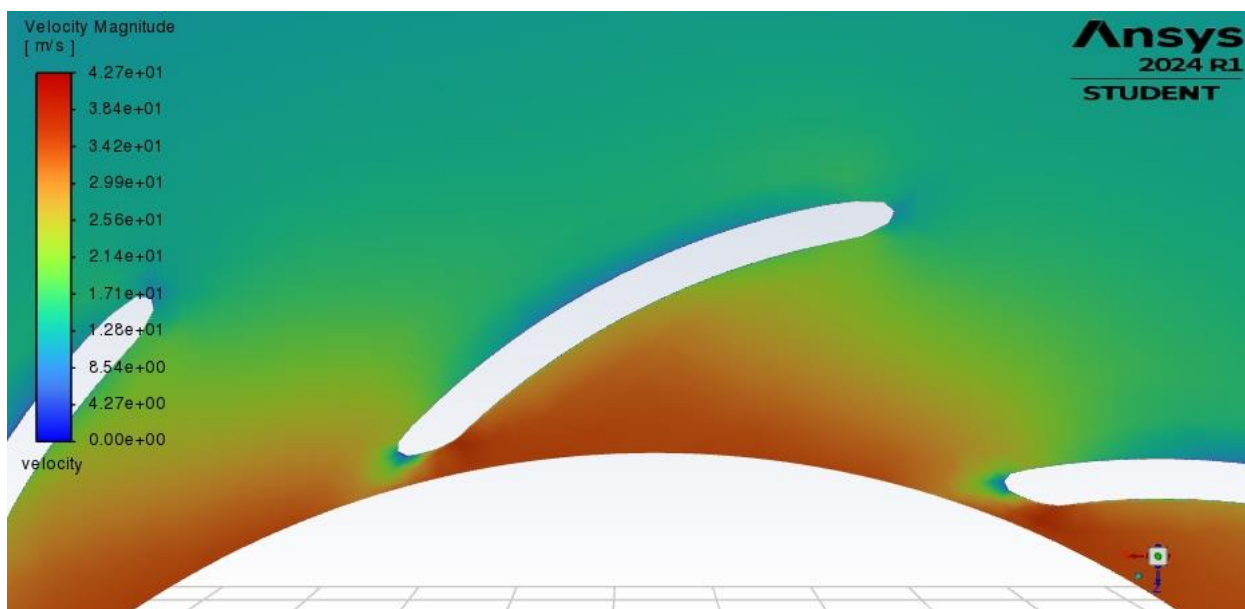


Slika 6.11 Konture brzina u XZ ravnnini za protok od 60 m<sup>3</sup>/s

Sa Slike 6.10 se može primijetiti da je brzina fluida najveća na izlazu iz spirale, odnosno na ulazu u „Outlet“, a najmanja na stijenkama odnosno zidovima spirale što se može vidjeti bolje na slici 6.12 i 6.13.

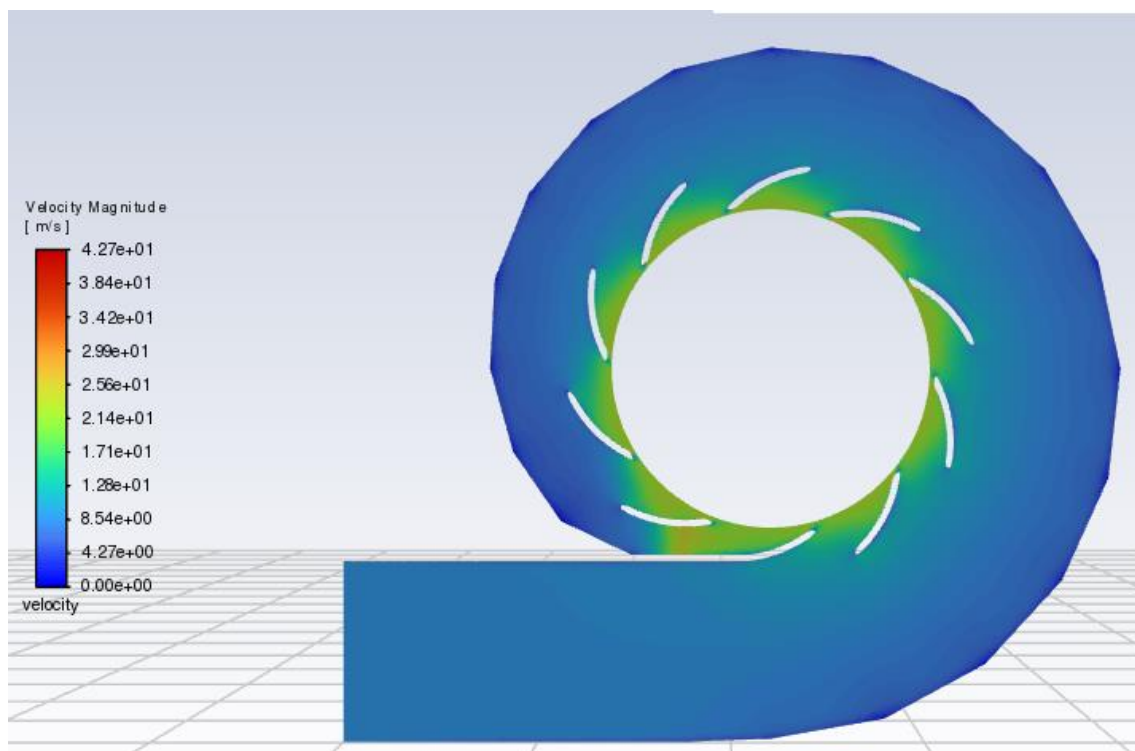


Slika 6.12 Detalj konture brzina fluida u XZ ravnini za protok od 60 m<sup>3</sup>/s

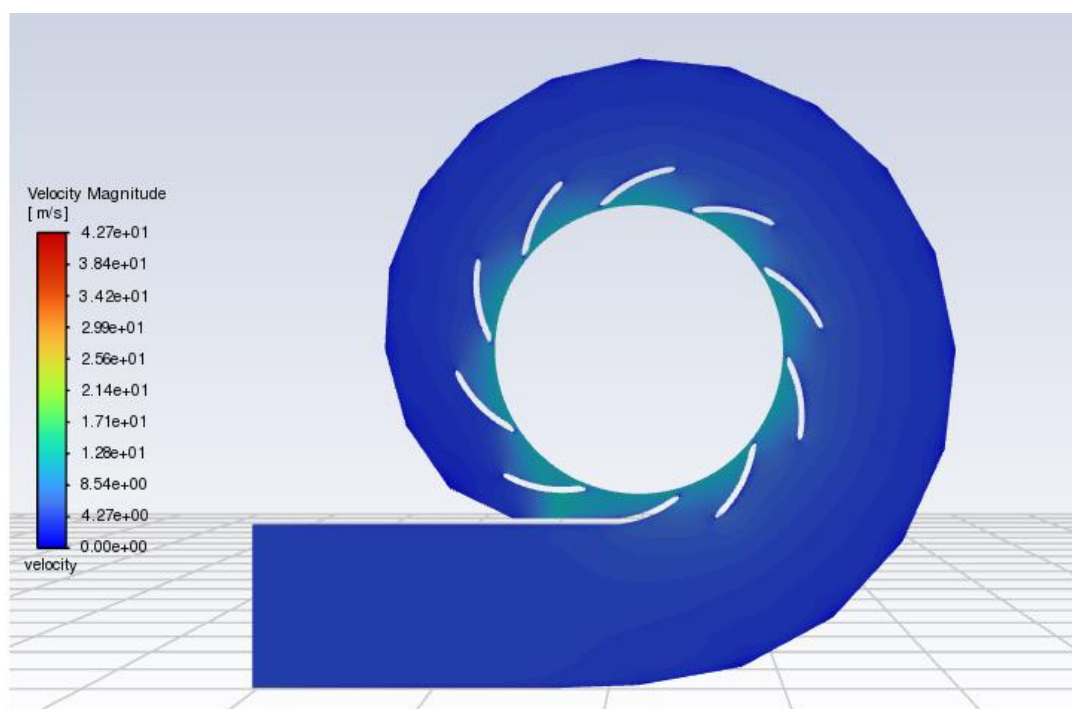


Slika 6.13 Detalj brzina fluida u XZ ravnini za protok od 20 m<sup>3</sup>/s na jednoj od lopatica

Na slikama 6.14 i 6.15 su prikazane konture brzina fluida za promatrane protoke.

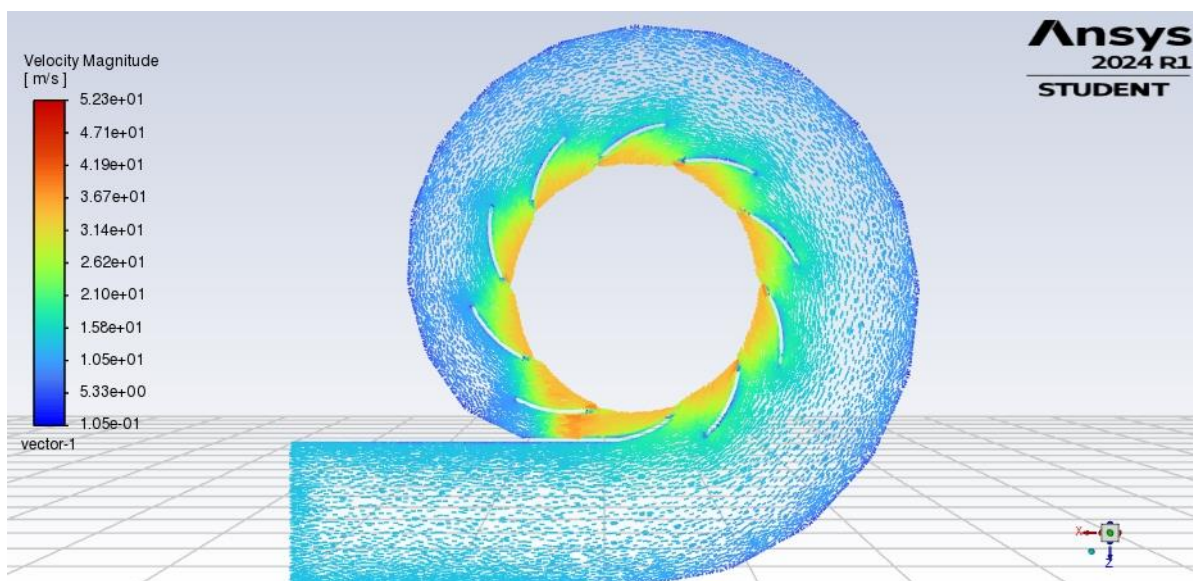


Slika 6.14 Konture brzina u XZ ravnini za protok od  $40 \text{ m}^3/\text{s}$

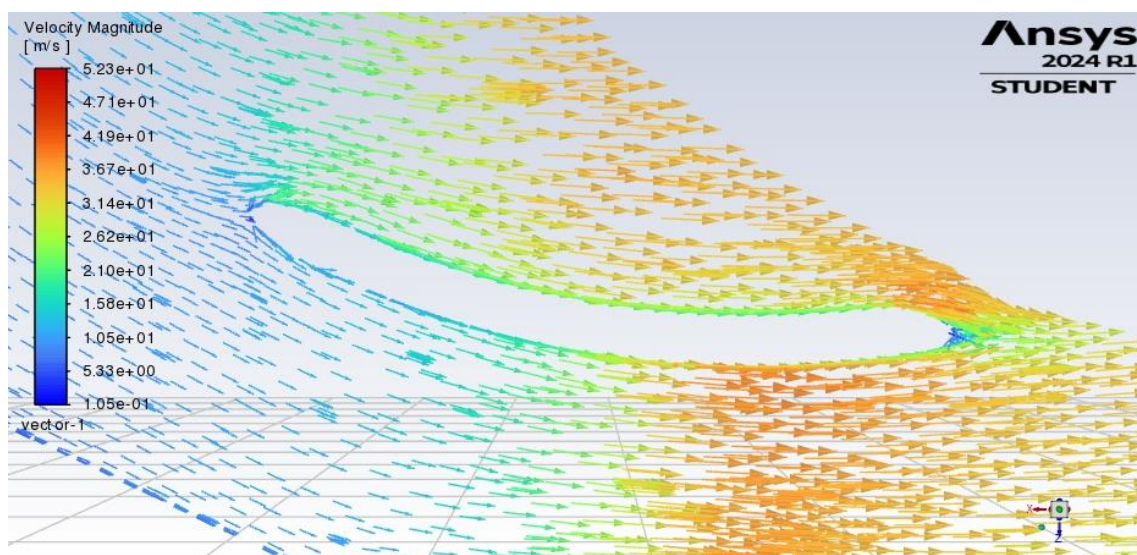


Slika 6.15 Konture brzina u XZ ravnini za protok od  $20 \text{ m}^3/\text{s}$

Brzina fluida se također može prikazati i vektorima brzina. Na slikama 6.16 i 6.17 su prikazani vektori brzina fluida u spirali i prstenu predprivodećih lopatica u XZ ravnini za protok od  $60 \text{ m}^3/\text{s}$ .



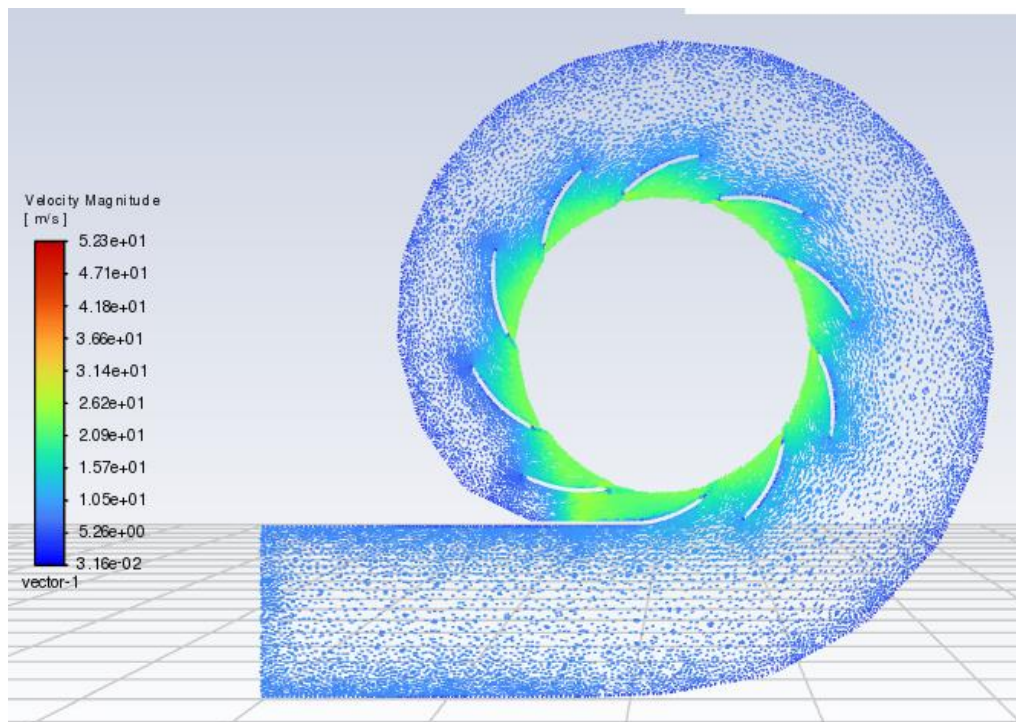
Slika 6.16 Vektori brzina u XZ ravnini za protok od  $60 \text{ m}^3/\text{s}$



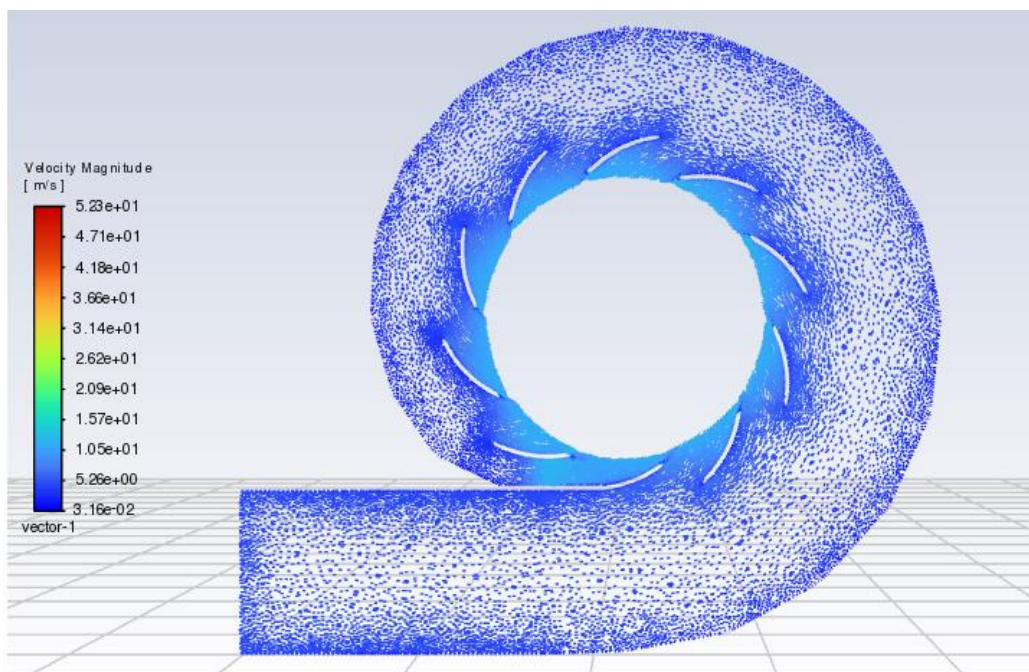
Slika 6.17 Detalj vektora brzina u XZ ravnini za protok od  $60 \text{ m}^3/\text{s}$

Na slikama 6.18 i 6.19 su prikazani vektori brzina za protoke  $40 \text{ m}^3/\text{s}$  i  $20 \text{ m}^3/\text{s}$ .





Slika 6.18 Vektori brzina u XZ ravnini za protok od  $40 \text{ m}^3/\text{s}$



Slika 6.19 Vektori brzina u XZ ravnini za protok od  $20 \text{ m}^3/\text{s}$

## 7. ZAKLJUČAK

U sklopu ovog rada izrađena je geometrija spirale vodne turbine s prstenom predprivodećih lopatica nakon čega se napravila numerička simulacija strujanja vode kroz isti model. U prvom dijelu rada su se ukratko opisali različiti tipovi turbina, njihove karakteristike, princip rada i njihovi glavni dijelovi. U sljedećem koraku se pobliže opisala konstrukcija spirale i njene različite izvedbe, a zatim se prelazi na izradu modela spiralnog kućišta. Zadatak ovog rada je analiza protoka fluida kroz spiralu Francis-ove turbine s pomoću naprednih tehnika računske dinamike fluida. Proučavanjem rezultata simulacije toka fluida dobiva se značajan uvid u složeno ponašanje fluida te njegovih karakteristika unutar danog volumena. Ovaj završni rad omogućuje vizualizaciju ponašanja fluida u spirali Francisove turbine s detaljnim prikazima statičkih i dinamičkih tlakova, njihovoj raspodjeli po profilu, konture brzina kao i vektore brzina. Uz dane rezultate ovaj rad povezuje praktično s teorijom tako da teoretsko znanje ponašanja fluida spaja s praktičnom uporabom naprednih računalnih alata. Također, ovaj rad pokazuje kako CFD software-a za analizu hidrauličkih strojeva ima ogroman utjecaj u njihovoj optimizaciji te pomaže u poboljšanju, pouzdanosti i održivosti spirale, ali i čitave turbine.

## 8. LITERATURA

- [1] „Turbostroj- Hrvatska enciklopedija“, <https://www.enciklopedija.hr/clanak/turbostroj>
- [2] Senčić, T. „Turbostrojevi“ dio predavanja kolegija Toplinski strojevi i uređaji, Rijeka
- [3] „Hidraulički stroj- Hrvatska enciklopedija“, <https://www.enciklopedija.hr/clanak/hidraulicni-strojevi>
- [4] „Vodna turbina- Hrvatska enciklopedija“, <https://www.enciklopedija.hr/clanak/vodna-turbina>
- [5] „Turbina- Hrvatska enciklopedija“, <https://www.enciklopedija.hr/clanak/turbina>
- [6] „Kaplanova turbina- Hrvatska enciklopedija“,  
<https://www.enciklopedija.hr/clanak/kaplanova-turbina>
- [7] „Peltonova turbina- Hrvatska enciklopedija“,  
<https://www.enciklopedija.hr/clanak/peltonova-turbina>
- [8] „Francisova turbina- Hrvatska enciklopedija“  
<https://www.enciklopedija.hr/clanak/francisova-turbina>
- [9] S interneta: <https://www.renovablesverdes.com/hr/Francisova-turbina/>
- [10] s interneta: <https://theconstructor.org/practical-guide/francis-turbines-components-application/2900/>
- [11] s interneta: <https://www.lesics.com/how-does-francis-turbine-work.html>
- [12] s interneta: <https://www.indiamart.com/proddetail/francis-turbine-21949169612.html>
- [13] Čarija, Z.: „Vodne turbine“, radni materijal predavanja kolegija Hidraulički strojevi, Rijeka, 2021.
- [14] „Design of Spiral Casing of Francis Turbine for Micro Hydro Applications“ D.R. Dahal et al 2019
- [15] "Vodne turbine" dr.sc. Zoran Čarija, Tehnički fakultet Rijeka, 2010.

- [16] S interneta: [https://hr.wikipedia.org/wiki/Francisova\\_turbina](https://hr.wikipedia.org/wiki/Francisova_turbina)
- [17] s interneta: [https://www.researchgate.net/figure/Measurement-locations-in-the-spiral-casing\\_fig19\\_275270573](https://www.researchgate.net/figure/Measurement-locations-in-the-spiral-casing_fig19_275270573)
- [18] s interneta: <https://savree.com/en/encyclopedia/kaplan-bulb-turbine>
- [19] s interneta: <https://www.firmametal.com/pelton-turbun/>
- [20] s interneta: <https://theconstructor.org/practical-guide/pelton-turbine-parts-working-design-aspects/2894/>
- [21] s interneta: <https://hr.wikipedia.org/wiki/CAD>
- [22] s interneta: [https://hr.wikipedia.org/wiki/Ra%C4%8Dunalna\\_dinamika\\_fluida](https://hr.wikipedia.org/wiki/Ra%C4%8Dunalna_dinamika_fluida)
- [23] s interneta: <https://en.wikipedia.org/wiki/Ansys>
- [24]S interneta: <https://innovationspace.ansys.com/product/intro-to-ansys-fluent/>

## 9. POPIS SLIKA

Slika 2.1 Razlika između akcijske i reakcijske turbine [2] .....	3
Slika 3.1 Prikaz Kaplanove turbine s generatorom [6] .....	5
Slika 3.2 Rotor Kaplanove turbine [18] .....	6
Slika 3.3 Primjer Peltonove turbine [19].....	6
Slika 3.4 Lopatice Peltonove turbine [20].....	7
Slika 3.5 Primjer Francisove Turbine [10].....	8
Slika 3.6 Prikaz regulacije protoka pomoću privodećih lopatica [11] .....	9
Slika 3.7 Rotor Francisove turbine [12] .....	9
Slika 4.1 Spirala Francisove turbine [9].....	10
Slika 4.2 Presjeci spiralnog kućišta turbine [17].....	11
Slika 4.3 Karakteristični presjeci i veličine koje se koriste za proračun promjera poprečnog presjeka spirale [13] .....	12
Slika 5.1 Poprečni presjeci spirale .....	14
Slika 5.2 3D model spirale .....	14
Slika 5.3 Predprivodeće lopatice Francisove turbine .....	15
Slika 5.4 Površina jedne predprivodeće lopatice u Inventoru .....	15
Slika 5.5 Završna geometrija spiralnog kućišta i prstena s predprivodećim lopticama .....	16

Slika 5.6 Završna geometrija spiralnog kućišta i prstena s predprivodećim lopticama iz drugog kuta.....	16
Slika 5.7 Primjer rezultata CFD simulacije [24] .....	17
Slika 5.8 Sučelje Ansys Workbencha .....	18
Slika 5.9 Geometrija fluida s numeričkom mrežom .....	19
Slika 5.10 Detalj numeričke mreže oko predprivodeće lopatice s inflacijom.....	19
Slika 5.11 Ulazni presjek s inflacijom .....	20
Slika 5.12 Postavke numeričke mreže.....	21
Slika 5.13 Rubni uvjeti.....	21
Slika 5.14 Fluent Launcher .....	22
Slika 6.1 Graf reziduala.....	25
Slika 6.2 Kontura statičkog tlaka u XZ ravnini za protok od 60 m <sup>3</sup> /s.....	25
Slika 6.3 Detalj statičkog tlaka oko predprivodeće lopatice za protok od 60 m <sup>3</sup> /s.....	26
Slika 6.4 Kontura statičkog tlaka u XZ ravnini za protok od 40 m <sup>3</sup> /s.....	26
Slika 6.5 Kontura statičkog tlaka u XZ ravnini za protok od 20 m <sup>3</sup> /s.....	27
Slika 6.6 Dinamički tlak u XZ ravnini za protok od 60 m <sup>3</sup> /s.....	27
Slika 6.7 Detalj dinamičkog tlaka oko predprivodeće u XZ ravnini za protok od 60 m <sup>3</sup> /s.....	28
Slika 6.8 Kontura dinamičkog tlaka u XZ ravnini za protok od 40 m <sup>3</sup> /s .....	28
Slika 6.9 Kontura dinamičkog tlaka u XZ ravnini za protok od 20 m <sup>3</sup> /s .....	29
Slika 6.10 Pad tlaka ovisno o protoku.....	30
Slika 6.11 Kontura brzina u XZ ravnini za protok od 60 m <sup>3</sup> /s.....	30
Slika 6.12 Detalj kontura brzina fluida u XZ ravnini za protok od 60 m <sup>3</sup> /s.....	31
Slika 6.13 Detalj brzina fluida u XZ ravnini za protok od 20 m <sup>3</sup> /s na jednoj od lopatica .....	31
Slika 6.14 Kontura brzina u XZ ravnini za protok od 40 m <sup>3</sup> /s.....	32
Slika 6.15 Kontura brzina u XZ ravnini za protok od 20 m <sup>3</sup> /s.....	32
Slika 6.16 Vektori brzina u XZ ravnini za protok od 60 m <sup>3</sup> /s.....	33
Slika 6.17 Detalj vektora brzina u XZ ravnini za protok od 60 m <sup>3</sup> /s .....	33
Slika 6.18 Vektori brzina u XZ ravnini za protok od 40 m <sup>3</sup> /s.....	34
Slika 6.19 Vektori brzina u XZ ravnini za protok od 20 m <sup>3</sup> /s.....	34

## **10. SAŽETAK**

U ovom završnom radu se opisuju različite vrste vodnih turbina, njihove karakteristike i razlike. Geometrija spiralnog kućišta Francis turbine i prstena s predprivodećim lopaticama napravljena je s pomoću software-a za 3D modeliranje- Autodesk Inventor s pomoću danih nacрта, a numerička simulacija s pomoću CFD software-a Ansys Fluent. Kroz rad se opisuje proces stvaranja geometrije spiralnog kućišta turbine s prstenom predprivodećih lopatica kao i numeričke mreže koja je potrebna za stvaranje simulacije. Potom su dani rezultati simulacija za tri različita protoka koji su prikazani grafički s pomoću kontura dinamičkog i statičnog tlaka, kontura brzina i vektora brzina.

Ključne riječi: Francis turbina, spiralno kućište, Ansys, CFD

## **SUMMARY**

In this final thesis, different types of water turbines, their characteristics and differences are described. The geometry of the spiral casing of the Francis turbine and guide blades was made using 3D modeling software- Autodesk Inventor and provided schemes, as well as a CFD software Ansys Fluent for the creation of the numerical simulation. This paper describes the process of creating the geometry of the turbine spiral casing with guide vanes as well as the creation of a numeric mesh that is needed for the creation of the simulation. The results are presented as graphical contours of three different flow rates for static and dynamic pressure, velocity contours and velocity vectors.

Key words: Francis turbine, Spiral casing, Ansys, CFD