

# Numerička analiza strujanja fluida u privodu Francisove vodne turbine tip 1

---

**Buhin, Patrik**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2023**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:921064>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-20**



*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Sveučilišni prijediplomski studij strojarstva

Završni rad

**NUMERIČKA ANALIZA STRUJANJA FLUIDA U PRIVODU  
FRANCISOVE VODNE TURBINE TIP 1**

Rijeka, srpanj 2023.

Patrik Buhin

0069086722

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Sveučilišni prijediplomski studij strojarstva

Završni rad

**NUMERIČKA ANALIZA STRUJANJA FLUIDA U PRIVODU  
FRANCISOVE VODNE TURBINE TIP 1**

Mentor: Prof. dr. sc. Zoran Čarija

Rijeka, srpanj 2023.

Patrik Buhin

0069086722

Rijeka, 13. ožujka 2023.

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

## ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: Patrik Buhin (0069086722)  
Studij: Sveučilišni prijediplomski studij strojarstva

Zadatak: **Numerička analiza strujanja fluida u privodu Francisove vodne turbine tip 1 / Fluid flow numerical analysis in Francis turbine distributor type 1**

### Opis zadatka:

U radu je potrebno izraditi CAD model privoda 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 protodoma. 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.

*Patrik Buhin*

Zadatak uručen pristupniku: 20. ožujka 2023.

Mentor:

*Čarija*  
\_\_\_\_\_  
Prof. dr. sc. Zoran Čarija

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit

*Žc*  
\_\_\_\_\_  
Izv. prof. dr. sc. Samir Žc

## **IZJAVA**

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

Rijeka, srpanj 2023.

Patrik Buhin

---

## ZAHVALA

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Zoranu Čariji na prilici i na pomoći tijekom izrade završnog rada. Također se zahvaljujem v. asist. dr. sc. Ivani Lučin na pomoći, odgovorima, savjetima i prijedlozima tijekom izrade rada.

# SADRŽAJ

1	UVOD .....	1
2	HIDROENERGIJA .....	3
3	VODNE TURBINE .....	5
4	FRANCISOVA TURBINA .....	7
5	RAČUNALNE SIMULACIJE.....	10
5.1	3D modeliranje .....	10
5.2	Numeričke mreže .....	11
5.3	CFD simulacije.....	12
6	IZRADA NUMERIČKE SIMULACIJE .....	14
6.1	Izrada predprivodećih lopatica .....	14
6.2	Izrada privodećih lopatica .....	16
6.3	Izrada numeričke mreže .....	20
6.4	Postavke numeričke simulacije .....	23
7	REZULTATI.....	24
7.1	Konture i vektori brzina .....	25
7.2	Statički tlak.....	28
7.3	Dinamički tlak .....	30
7.4	Totalni tlak .....	31
7.5	Strujnice brzina.....	33
8	ZAKLJUČAK .....	35
9	LITERATURA.....	36
10	POPIS SLIKA.....	37
11	SAŽETAK .....	39
12	ABSTRACT.....	40

# 1 UVOD

Vodna energija predstavlja jedan od ekološko prihvatljivih, najboljih, obnovljivih izvora energije koji koristi prirodni tok vode za proizvodnju električne energije. Usporedbom s drugim izvorima električne energije, hidroenergija također ima relativno male troškove tijekom cijelog životnog vijeka u smislu održavanja, rada i goriva. Kao što je slučaj kod skoro svih većih izvora energije, troškovi na početku su značajni i neizbježni. Životni vijek hidroelektrane je samim time dulji i raspoređuje te troškove tijekom vremena. Za pretvorbu vodne energije u električnu energiju koriste se hidroelektrane koje se sastoje od vodnih turbina. Hidroelektrane su vrlo siguran i značajan izvor električne energije u energetskom sustavu te se vrlo lako mogu prilagoditi potrebama samog sustava. Hidroelektrane imaju mogućnost dosta preciznog i točnog predviđanja buduće proizvodnje što dozvoljava dobro planiranje i optimizaciju proizvodnje električne energije u kombinaciji s drugim izvorima energije. Vodne turbine omogućavaju iskorištavanje vodne energije. Kako bi se navedeni izvori maksimalno iskoristili potrebno je napraviti optimizirani dizajn vodne turbine. U tu svrhu moguće je provesti numeričko ispitivanje različitih dizajna kako bi se odredio optimalni oblik lopatica koje su jedne od najbitnijih dijelova.

Cilj rada je napraviti numeričku analizu strujanja fluida za zadanu geometriju. Konkretno će se analizirati strujanje fluida u privodu Francisove turbine. Prvenstveno bit će diskretizirana kreirana geometrija predprivodećih i privodećih lopatica mrežom kontrolnih volumena. Uz to bit će prikazan turbulenti tok nekompresibilnog fluida pri različitim položajima privodećih lopatica odnosno jedinog pokretnog dijela Francisove turbine. Za što bolje razumijevanje teme u sljedećim poglavljima bit će iznesene osnove o vodnoj energiji, vodnim turbinama, Francisovoj turbini te predprivodećim i privodećim lopaticama.

U prvom poglavlju biti će dana teoretska podloga o hidroenergiji te primjeri primjene iste. Drugo poglavlje obuhvatit će teoretsku podlogu o vodnim turbinama odnosno kako su nastale, osnovna podjela turbina i primjeri. U trećem poglavlju biti će opisana Francisova turbina, njezini osnovni dijelovi uz naglasak na predprivodeće i privodeće lopatice, te sam način rada Francisove turbine. Također će biti nabrojani primjeri hidroelektrana u Hrvatskoj gdje se takve vrste turbina koriste. U četvrom poglavlju biti će dana teorijska osnova o 3D modeliranju, numeričkim mrežama te računalim simulacijama. Nakon teorijskih osnova bit će opisana izrada zadane geometrije u CAD software-u Catia.



Sljedeće poglavlje obuhvatiti će izradu numeričke mreže kontrolnih volumena uzimajući u obzir prethodno izrađenu geometriju. Za izradu numeričke mreže koristiti će se program ANSYS Workbench.

Iduće poglavlje obuhvaćat će numerički proračun koji se radi u programu za računalnu dinamiku fluida ANSYS Fluent, odnosno postavljanje parametara simulacije i pokretanje samog proračuna kako bi se dobilo rješenje koje će se prikazati i analizirati u grafičkom obliku.

Na kraju slijedi zaključak samog rada odnosno kako i na koji način utječu različiti protoci nekompresibilnog fluida i položaji privodećih lopatica na sami tok fluida u Francisovoj turbini.

## 2 HIDROENERGIJA

Energija je sposobnost nekog tijela da obavi rad. Iz zakona o očuvanju količine energije, energija se ne može stvoriti niti ne može nestati nego može isključivo promijeniti svoj oblik odnosno pretvoriti se iz jedne energije u drugu. Hidroenergija odnosno energija vode je snaga koja se dobije iz sile odnosno energije vode. Takva dobivena energija može se uporiječiti u korisne svrhe za čovjeka. Energija vode koristila se za navodnjavanje polja i pogon raznih strojeva prije nego što je električna energija uopće postala dostupna svima. Hidroenergija je jeftin, pouzdan, svestran i obnovljiv izvor čiste proizvodnje električne energije i odgovornog upravljanja vodom. Oko 60% sve obnovljive električne energije na svijetu proizvedeno je iz hidroelektrana. Indija, Brazil, Kina, Kanada i SAD najveći su proizvođači hidroenergije po instaliranom kapacitetu. [1]

U svom posebnom izvješću o tržištu hidroenergije za 2021., Međunarodna agencija za energiju (IEA) izvješćuje da hidroenergija čini gotovo trećinu svjetskog kapaciteta za fleksibilnu opskrbu električnom energijom i ima potencijal pružiti čak i više. Hidroenergija je među najčišćim izvorima električne energije, s niskim intenzitetom emisije stakleničkih plinova u usporedbi s drugim oblicima energije. [1]

U Hrvatskoj hidroelektrane čine koro pola elektrana u cijeloj strukturi Hrvatskog elektroenergetskog sustava. Iznos nazivne snage ukupnih hidroelektrana u Hrvatskoj je 2008. godine bila 2097 MW, što bi bilo oko 55% ukupne snage svih elektrana u Hrvatskoj. Republika Hrvatska stoga pripada među zemlje koje proizvode najviše električne energije iz obnovljivih izvora energije. U Hrvatskoj 2007. se proizvelo 4357 GWh električne energije pomoću hidroelektrana. To je oko 25% električne energije koja je preuzeta u elektroenergetski sustav u Hrvatskoj. 2008. je to bilo 5277 GWh, što bi približno bilo 29% električne energije koja je preuzeta u elektroenergetski sustav RH. Problem je taj što se još uvijek veliki dio električne energije uvozi. U Hrvatskoj je danas u radu 17 velikih hidroelektrana (to su hidroelektrane s više od 10 MW), protočnog i akumulacijskog tipa. Također je u pogonu 20 malih hidroelektrana (snaga malih hidroelektrana je od 0,5 do 10 MW). Uz to Hrvatska ima nekoliko manjih odnosno mini (to su hidroelektrane od 0,1 do 0,5 MW) i mikro hidroelektrana (to su hidroelektrane od 5 do 100 kW). HE Zakučac je najveće hidroelektrana koja se nalazi na području Republike Hrvatske. Hidroelektrana Zakučac distribuira gotov trećinu zajedničke hidroenergije u Hrvatskoj. Ukupna instalirana snaga navedene elektrane je 486 MW. [15]

Najveća hidroelektrana na svijetu je hidroelektrana Tri klanca (slika 2.1) koja je smještena u Kini konkretno na rijeci Jangce, odnosno na trećoj najdužoj rijeci na svijetu.

Ograničena proizvodnja električne energije pomoću navedene hidroelektrane započela je još 2003. i povećavala se postupno kako su se tijekom godina uključivale turbine sve do 2012. Tada su radile sve 32 turbine snagom svake od 700 MW.

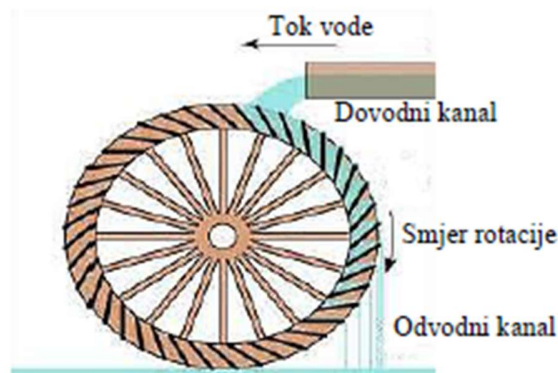
Tih 32 turbina, zajedno s još 2 dodatna generatora svaki sa snagom od 50 MW, dale su hidroelektrani kapacitet za generiranje 22 500 MW električne energije. To je čini najproduktivnijom hidroelektranom na svijetu. [16]



*Slika 2.1 Najveća hidroelektrana na svijetu – Tri klanca, Kina [2]*

### 3 VODNE TURBINE

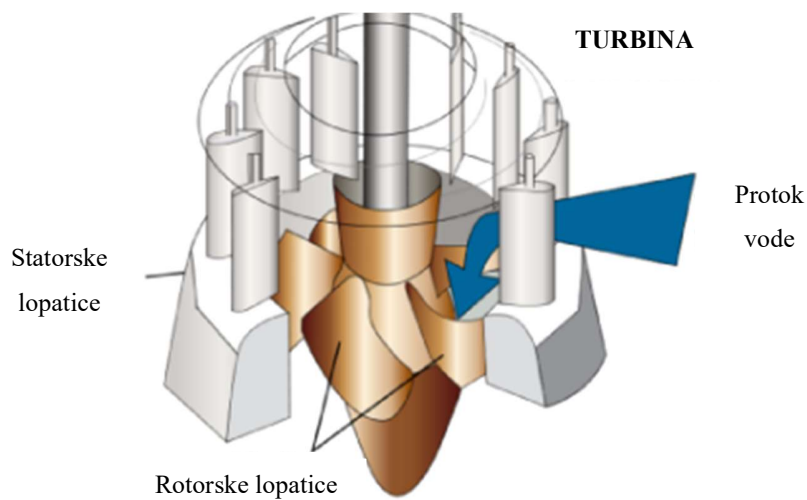
Na početku 19. Stoljeća francuski inženjer Claude Burdin osmislio je riječ turbina. Riječ turbina je podrijetlom latinska riječ za vrtloženje odnosno vir. Komponenta gibanja vode koja omogućuje da vodna turbina bude nešto manjih dimenzija od vodnog kola je vrtložna komponenta gibanja vode. Unatoč manjih dimenzija ta komponenta omogućuje da turbina bude iste snage kao i vodno kolo većih dimenzija. Vodeničko kolo se preko tisuću godina koristilo za dobivanje snage u industrijama. Najveći nedostatak koji ima vodeničko kolo je njegova veličina koja ograničava protok i tlak koji se mogu iskoristiti. [4]



Slika 3.1 Vodeničko kolo [4]

Više od stotinu godina je trajala promjena s nekadašnjeg vodeničkog kola na moderne turbine koje danas koristimo. Moderne turbine koji su danas u uporabi razvile su se za vrijeme industrijske revolucije pomoću metoda i znanstvenih principa. Vodna turbina je zapravo stroj za pretvorbu energije u kojemu se prvo potencijalna energija vode pretvori u kinetičku energiju vode. Nakon toga se kinetička energija vode pretvara u mehaničku energiju koja pomoću generatora generira električnu energiju. Protok vode usmjerava se na rotorske lopatice turbine i samim time stvara silu na lopaticama. [4]

Vodna turbina se konstrukcijski ne razlikuje puno od ostalih turbina. U većini slučajeva osnovni dijelovi vodnih turbina su kućište sa statorskim lopaticama i rotora koji se sastoji od rotorskih lopatica. [4]



*Slika 3.2 Primjer vodne turbine [4]*

Vodne turbine dijele se na dvije skupine:

1. Akcijske (impulsne) turbine
2. Reakcijske (reaktivne) turbine

Glavna razlika između akcijskih i reakcijskih turbina je područje u kojemu dolazi do pada tlaka. Kod akcijskih turbina, sveukupni pad tlaka događa se u statorskim lopaticama, a kod reakcijskih turbina dolazi do pada tlaka djelomično u statorskim lopaticama i djelomično u rotorskim lopaticama

## 4 FRANCISOVA TURBINA

Francisove turbine su jedne od najviše korištenih hidroturbina na svijetu. Uključuju 60% globalnih hidroenergetskih kapaciteta u svijetu. Francisova turbina je vrlo velik mehanički rotacijski uređaj koji se koristi za promjenu energije toka fluida u električnu energiju. Navedeni tipovi turbina koriste se već preko sto godina za proizvodnju industrijske energije. Trenutno se koriste za proizvodnju hidroenergije u hidroelektranama. Francisove turbine rade vrlo efikasno u širokom rasponu radnih uvjeta. [6]

Prvenstveno se koristi za proizvodnju električne energije pomoću generatora električne energije. Navedene turbine imaju vrlo visok stupanj iskoristivosti, konkretno s preko 90%. Također imaju vrlo širok opseg djelovanja u odnosu na visinu pri protoku fluida kroz samu turbinu. Navedeno je pogotovo istaknuto kod vode kod koje se može dobiti najoptimalniji rad pri padu od 20 m do preko 700 m. Snaga na izlazu može biti od nekoliko kW do preko 750 MW. Na Francisovoj turbini broj okretaja rotora može biti od 83 do 1000 okr/min, a promjer rotora može biti od 1 metar do 10 metara. [5]



*Slika 4.1 Primjer Francisove turbine [8]*

Spirala odnosno ulazni dio fluida u Francisovu turbinu, smanjenjem svog poprečnog presjeka od ulaza prema izlazu, mora osigurati pravilnu rasporedbu vode na svojem izlazu. Nakon što se fluid pravilno rasporedi, dolazi iz spirale prema predprivodećim i privodećim lopaticama, a one svojim položajem i oblikom moraju osigurati ispravan smjer vode prema rotorskim lopaticama. Nakon toga vrši se pretvorba energije u mehanički rad pomoću samog rotora. Nakon što voda prođe kroz rotor odvodi se difuzorom u odvodni kanal. Postupnim povećanjem protočnog presjeka, difuzor smanjuje izlaznu energiju vode odnosno povećavajuća ukupnu iskoristivosti cijele Francisove turbine. [5]

Spirala Francisove turbine je većinom napravljena iz čelika. Spirala je kružnog poprečnog presjeka. Taj kružni poprečni presjek spirale postupno se umanjuje prema kraju spirale na kojem postaje eliptičnog oblika. Najveći poprečni presjek spirale je na samom ulazu. [3]

Rotor Francisove turbine u većini slučajeva ima 12 do 17 lopatica, a postoje i izvedbe koje sadrže i preko 20-ak lopatica (npr. Hidroelektrana u Dubrovniku ima 24 rotorske lopatice). Rotorske lopatice tvore zakrivljeni kanali kroz koje prolazi fluid odnosno voda. Rotorske lopatice učvršćene su s donje strane na vijenac rotora, a s gornje strane na glavčinu [3]

Odsisna cijev odnosno difuzor smanjenjuje izlaznu brzinu fluida koji prolazi kroz njega nakon što fluid prenese svoju energiju na rotorske lopatice, povećanjem poprečnog presjeka prema svojem izlazu. Samim time se smanjuju gubici energije na izlazi i povećava se ukupna korisnost turbine. Difuzor nam omogućuje rad turbine koji ne ovisi o promjenama razine vode. U slučaju da imamo turbinu s okomitim vratilom, difuzor će promijeniti smjer strujanja vode iz okomitog smjera u vodoravni smjer, uz najmanje moguće gubitke. [5]

Predprivodeće lopatice se u većini slučajeva sastoje od 10 do 12 lopatica. Nalaze se nakon spirale (ako gledamo putanju fluida prema izlazu). Lopatice dodatno usmjeruju i umiruju struju fluida na putu prema privodećim lopaticama odnosno samom regulacijskom aparatu uz najmanje moguće gubitke. Predprivodeće lopatice su fiksne odnosno ne postoji mogućnost promjene položaja istih. [3]

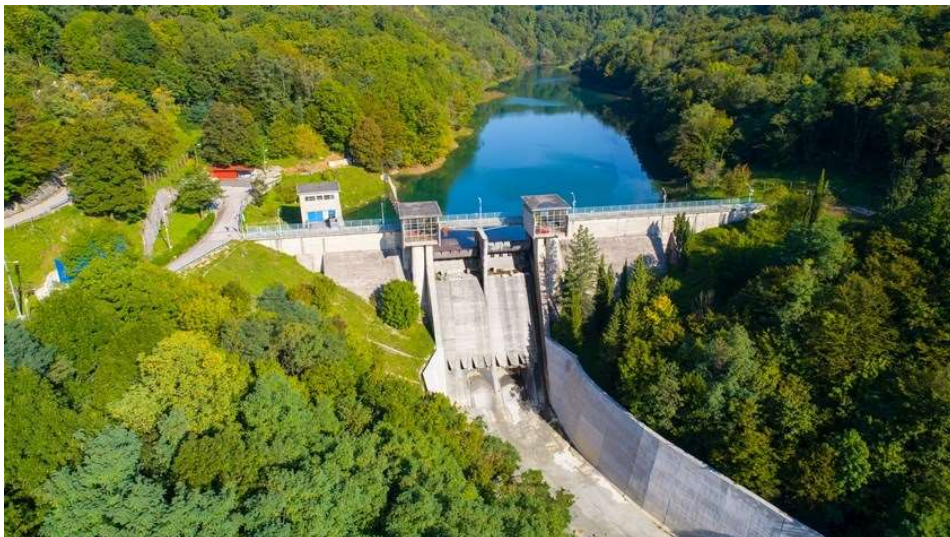
Regulacijski aparat se u većini slučajeva sastoji od 20 do 24 privodećih lopatica koje pomoću svojeg položaja (promjenjivog) i oblika određuju smjer strujanja fluida na ulazno rotora odnosno rotorskih lopatica. Privodeće lopatice promjenom svojeg položaja, odnosno zakreta kuta mijenjaju izlaznu snagu same turbine te se ista može podesiti na onu koja nam je potrebna. Povećanjem kuta lopatica povećava se protok kroz privod turbine odnosno protok prema samom rotoru (rotorskim lopaticama) te se samim time povećava izlazna snaga turbina koja je maksimalna kada su privodeće lopatice maksimalno otvorene.

Rotorske lopatice su dizajnirane baš za takav položaj privodećih lopatica. Smanjenjem kuta privodećih lopatica smanjuje se protok kroz privod i samim time izlazna snaga turbine.

Privodeće lopatice u regulacijsom aparatu jedini su dijelovi Francisove turbine (osim rotora) koje pomoću svojeg položaja (mogućnost promjene kuta) reguliraju sam tok fluida kroz turbinu pa su zbog toga glavna stavka koja utječe na izlaznu snagu koja se dobije odnosno na količinu generirane električne energije. [3]

Primjeri:

- HE Rijeka 213 m
- HE Gojak 118 m
- HE Senj 410 m
- HE Zakučac 250 m



*Slika 4.2 Hidroelektrana Rijeka [7]*



## 5 RAČUNALNE SIMULACIJE

### 5.1 3D modeliranje

Trodimenzionalno modeliranje je zapravo kreiranja matematičkog prikaza nekog 3D objekta. Rezultat 3D modeliranja je 3D model. [9]

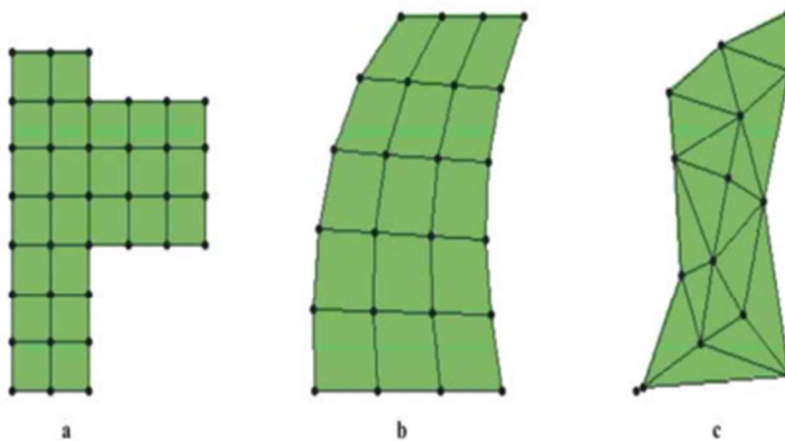
Oblikovanje s pomoću računala odnosno CAD je zapravo korištenje računala za kontruiranje, oblikovanje, projektiranje i vizualizaciju predmeta koji se želi dobiti. Oblikovanje pomoću računala vrlo je zastupljeno skoro u svim granama strojarstva, građevinarstva, elektrotehnike, arhitekture i zrakoplovstva. [10]

Gemetriju predprivodećih i privodećih lopatica potrebnih za numeričku analizu strujanja fluida u privodu Francisove vodne turbine izrađena je u programu za 3D CAD modeliranje Catia.

Catia nam daje sposobnost da modeliramo bilo koji željeni proizvod i da činimo u kontekstu njegovog ponašanja u realnom životu. Strojari, dizajneri, arhitekti sustava, inženjeri, građevinski stručnjaci i svi suradnici mogu definirati, zamisliti i oblikovati povezani svijet. [11]

## 5.2 Numeričke mreže

Prvi korak svake numeričke simulacije strujanja fluida je generiranje odgovarajuće geometrijske mreže. Numerička mreža potrebna je za opisivanje područja kojim će se gibati fluid, bez nje se isto ne bi moglo opisati. Jedan od bitnih čimbenika prostorne diskretizacije je definicija određenog tipa numeričke mreže. Na slici 6.1 prikazani su tipovi dvodimenzijske mreže, ali vrijede i za 3D. [13]



*Slika 5.1 Neki tipovi 2D numeričke mreže: a. regularna ortogonalna; b. neregularna strukturirana; c. nestrukturirana [12]*

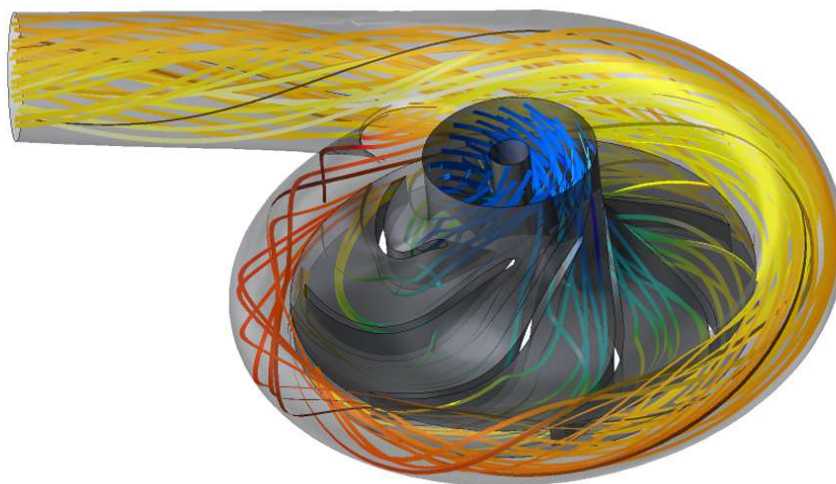
Nestrukturirana numerička mreža je jednostavnija za generiranje i puno bolja je za opis geometrije. Područje od interesa se obično ugušćava radi boljih rezultata, ali više elemenata vodi do duljeg vremena trajanja generiranja mreže i simulacije.

### 5.3 CFD simulacije

Glavni cilj računalne dinamika fluida (CFD) odnosno Computational Fluid Dynamics je primjena iskustva i znanja iz područja mehanike fluida kako bi se izradili računalni modeli za stjecanje novih znanja o nekim specifičnim poteškoćama kojima se možemo susresti u samoj dinamici odnosno mehanici fluida. U zadnjih nekoliko godina, računalna dinamika fluida je narasla mnogo više od jednostavne primjene mehanike fluida u otklanjanju svojih poteškoća. U današnje vrijeme modeliraju se termodinamički i kemijski procesi u tekućinama. Modeli koji su kreirani pomoću računalne dinamike fluida nadopunjuju se modelima gibanja čestica unutar tekućina (sedimentacija), bioloških sustava (rast faune i flore u vodenim putovima i mikrobnih zajednica). [13]

Računalna dinamika fluida se u osnovi koristi većinom za provjeru dinamike fluida jer se hidrostatika dosta točno modelira i tradicionalnim analitičkim metodama, a hidrostatički problemi nisu interesantni za računalne modele. Zato je dinamika fluida izuzetno su složena i nepredvidljiva. Računalne simulacije su postale je jedini način kojim bi se vidjeli u unutarnji fenomeni koji se dešavaju tijekom gibanja fluida.

Svrha računalne dinamike fluida je kreirati modele koji su dosta točni za rješavanje određenog problema i izvesti simulacije koje su precizne kako bi se postiglo dovoljno razumijevanje ponašanja fluida. [13]



*Slika 5.2 Primjer CFD simulacije [14]*

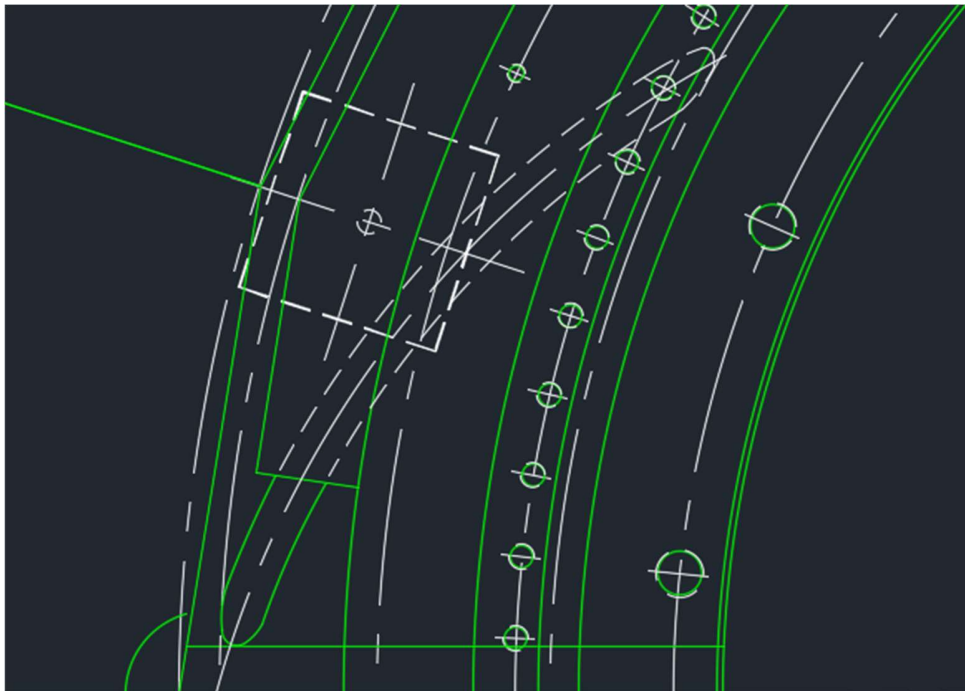
Uobičajeno je primijeniti rješenja koja su rezultat modeliranja protoka tekućine oko strukture kako bi se optimizirao oblik te iste strukture. Na taj način se dobije veći stupanj korisnosti. Primjer toga bilo bi kreiranje simulacije strujanja fluida oko lopatica plinske, vodne, parne turbine i kompresora koja bi dovela je do redizajna lopatica jer bi se vidjelo gdje su najveći gubici samim time bi došlo do poboljšanja iskorištenja turbina za hidroelektrane, turbokompresore, brodske i zrakoplovne turbinske motore. Još jedan primjer toga bio bi ako bi se kreiralo strujanja zraka oko karoserije auta čiji rezultat može dovesti do promjene karoserije u oblik s znatno nižim koeficijentom aerodinamičkog otpora. Utjecaj koji bi bio na automobil je tada također puno manji (manji bočni vjetar, a vožnja je puno sigurnija). [13]

Korištenje rezultata koji su dobiveni kreiranjem simulacija pomoću računalne dinamike fluida na strukturnu optimizaciju nije jedino područje primjene u strojarstvu. Računalna dinamika fluida također može imati vrlo širok raspon primjena u strojarstvu. Modeliranje protoka fluida kroz cijevi može pomoći u projektiranju optimalnijih cijevi koji su samim time i nešto jeftiniji s čvrstoćom koja je dovoljna za naše potrebe, neovisno radi li se o malim sustavima ili velikim vodoopskrbnim i odvodnim cijevima u hidroelektranama.

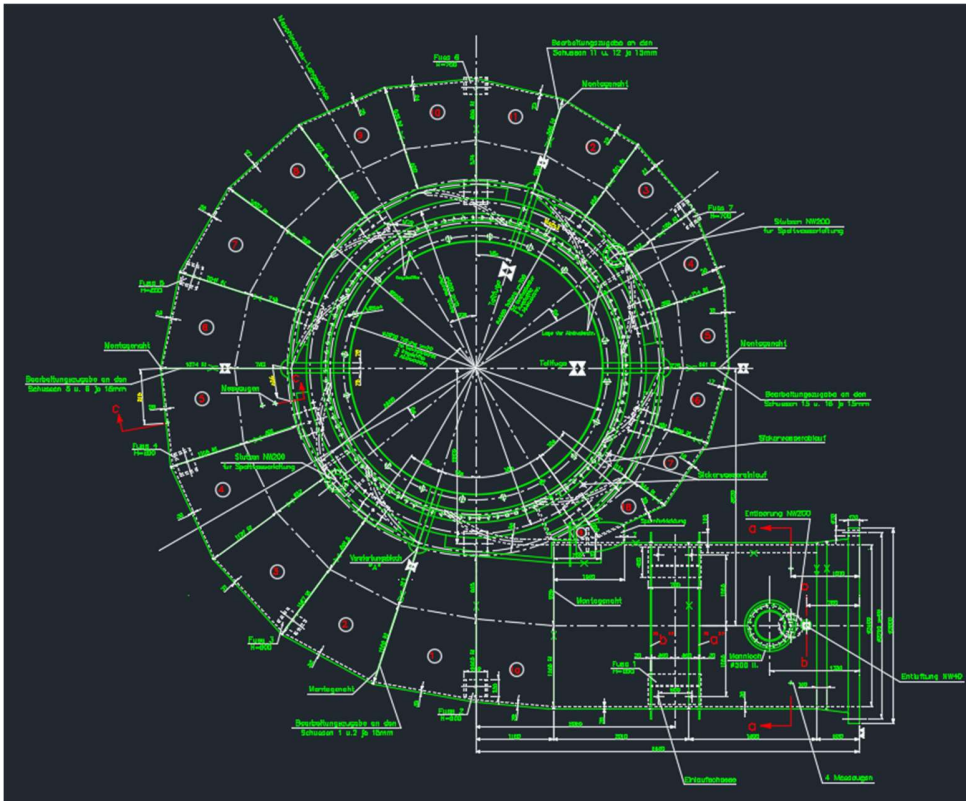
## 6 IZRADA NUMERIČKE SIMULACIJE

### 6.1 Izrada predprivodećih lopatica

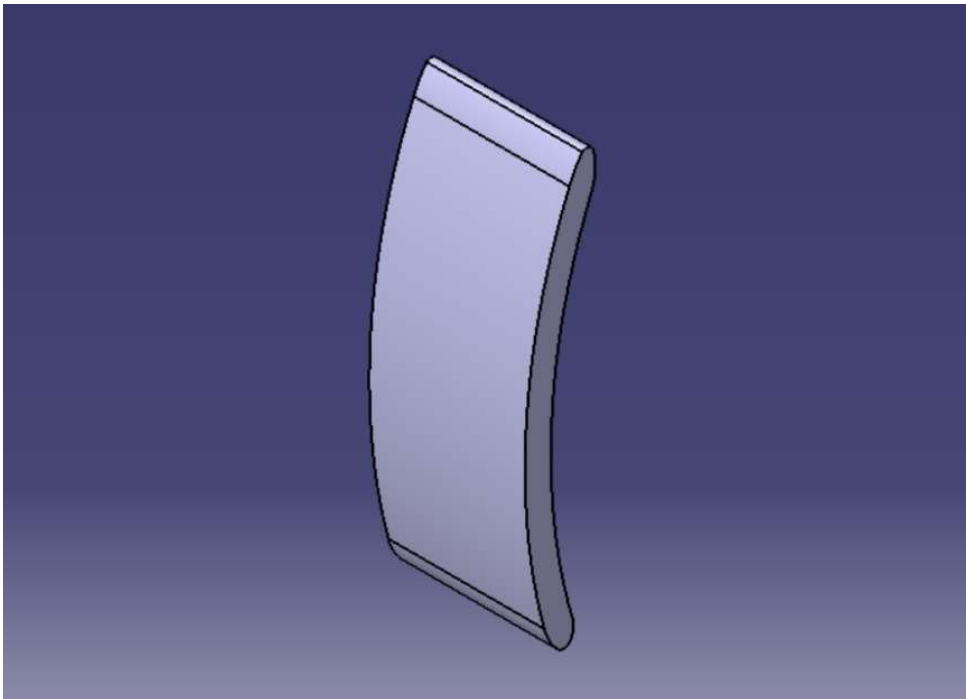
Potrebne dimenzije i pozicije zadane su u CAD programu AutoCAD i korištene su za izradu samih lopatica. Na slici 6.1 i 6.2. prikazani su nacrti u AutoCAD- u s potrebnim dimenzijama i položajima potrebnih za izradu lopatica. Turbina se sastoji od 10 potpuno istih predprivodećih lopatica koje su smještene na obodu od 4,92 m. Sama duljina predprivodeće lopatice je oko 1,5 m, debljina oko 8,5 cm, a lopatice su razmaknute međusobno za  $36^\circ$ .



*Slika 6.1 Oblik predprivodeće lopatice u privodu turbine*



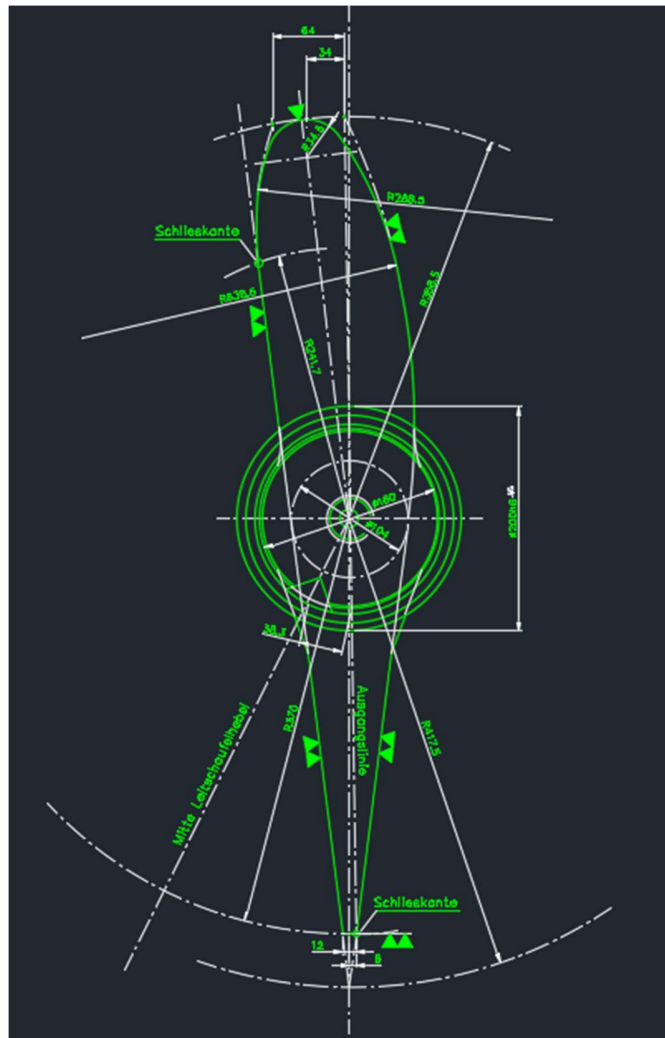
Slika 6.2 Nacrt privoda turbine sa svim pozicijama i dimenzijama



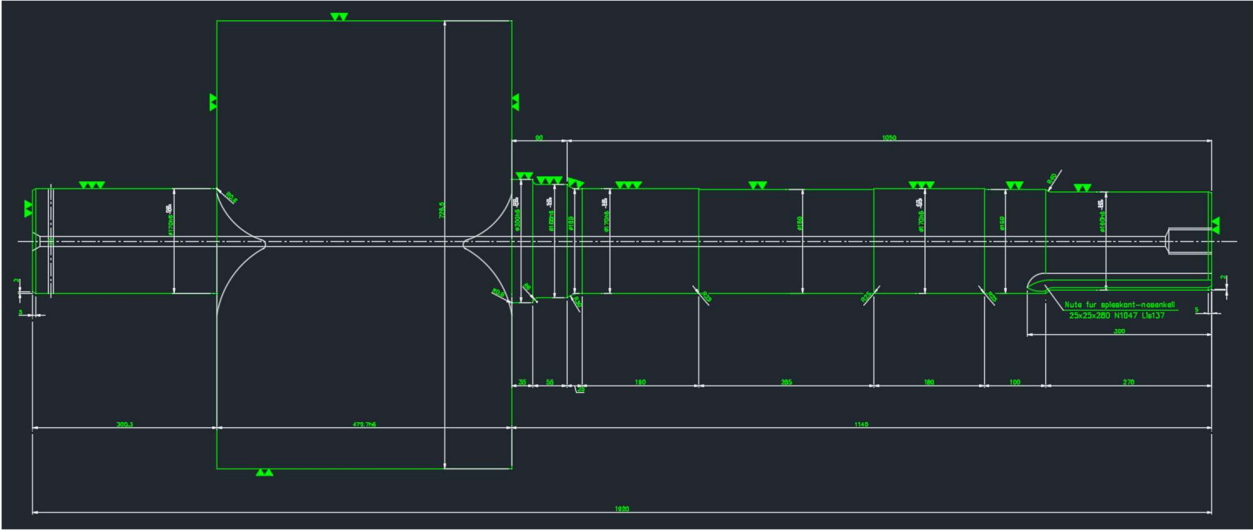
Slika 6.3 Predprivodeća lopatica izrađena u Catii

## 6.2 Izrada privodećih lopatica

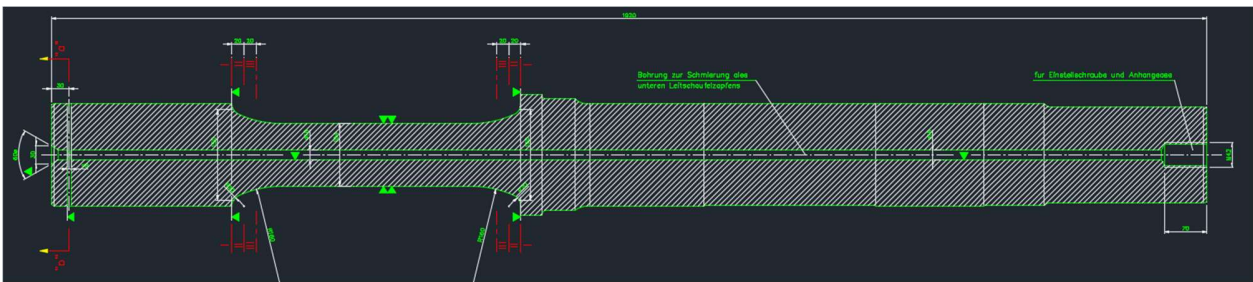
U svrhu izrade numeričke analize strujanja fluida u privodu Francisove turbine također je potrebno izraditi i privodeće lopatice navedene turbine. Na slici 6.4, 6.5 i 6.6 prikazane su sve dimenzije u AutoCAD-u potrebne za izradu privodeće lopatice. Turbina se sastoji od 20 jednakih privodećih lopatica koje su smještene na obodu od 3,91 m i razmaknute međusobno za  $18^\circ$ . Duljina privodeće lopatice je oko 72,85 cm, debljina na najdebljem dijelu iznosi oko 12 cm, a širina lopatice iznosi oko 47,97 cm bez osovine koja upravlja samom lopaticom odnosno koja mijenja kut privodećoj lopatici. Širina lopatice uz tu osovinu bi iznosila oko 1,92 m. Masa lopatice uz osovinu iznosi oko 500 kg.



Slika 6.4 Nacrt privodeće lopatice



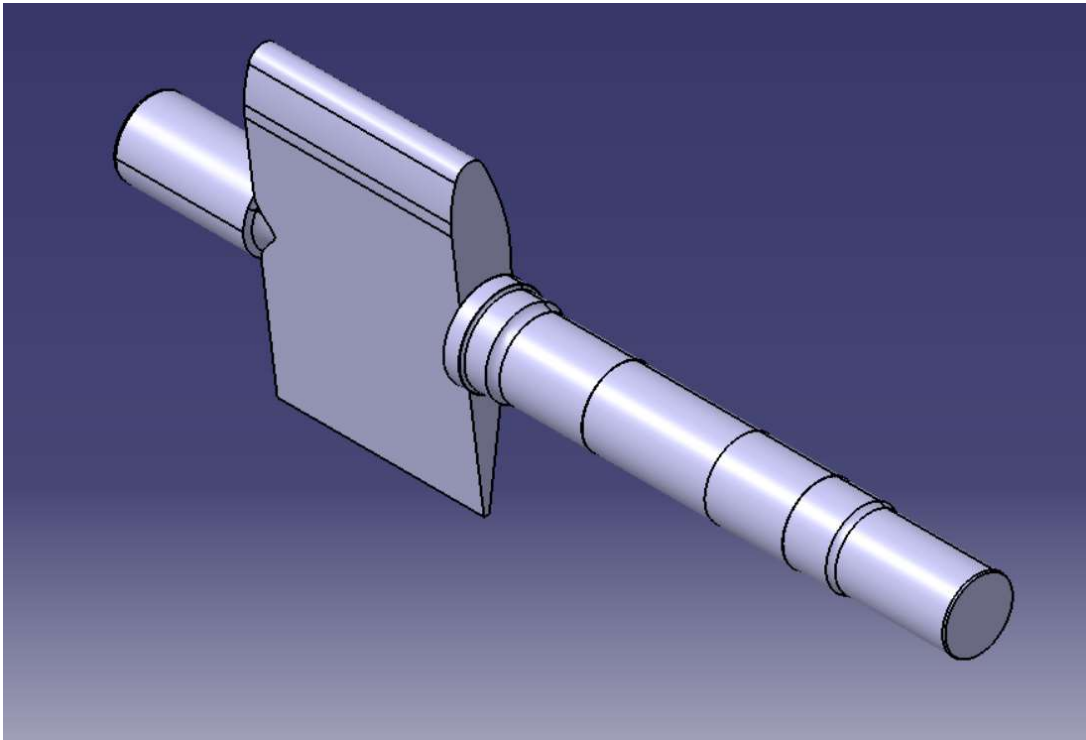
*Slika 6.5 Bokocrt privodeće lopatice*



*Slika 6.6 Presjek privodeće lopatice*

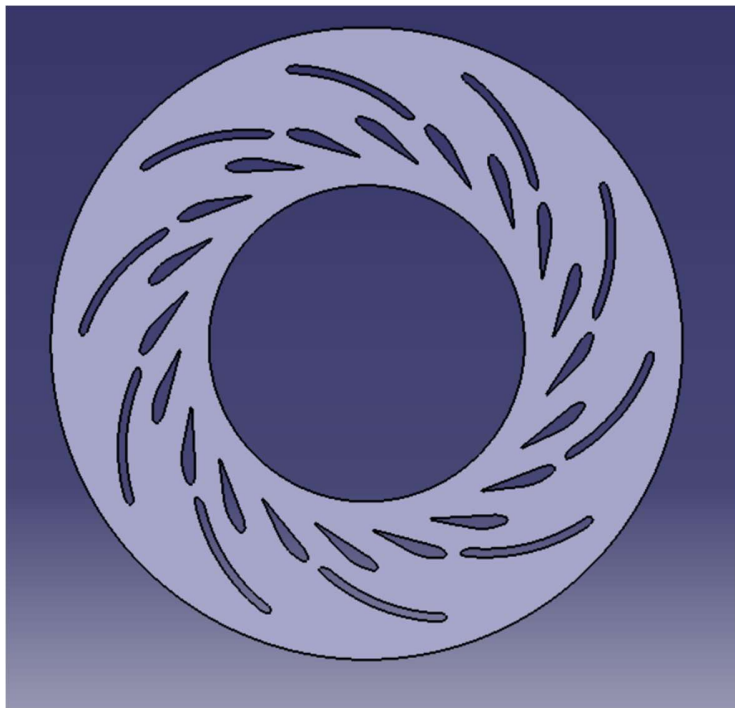
Privodeća lopatica kreirana je također prema zadanim dimenzijama u programu za 3D modeliranje Catia. Na slici 6.7 prikazan je kreirani cijeli model privodeće lopatice.





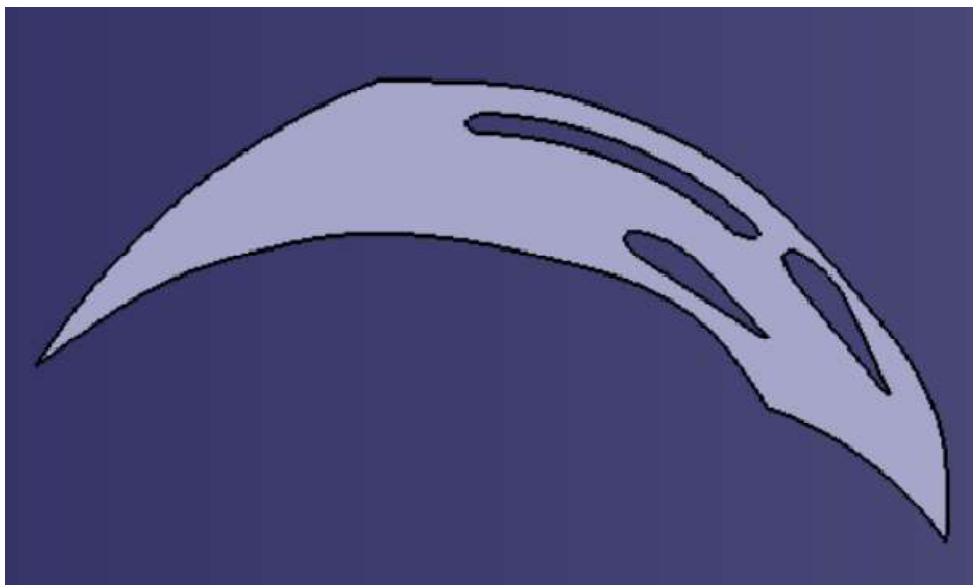
*Slika 6.7 Privodeća lopatica izrađena u Catii*

Radi pojednostavljenja uzet je samo osnovni oblik privodeće lopatice jer nam je on dovoljan za izradu same simulacije pošto će ista biti prikazana u 2D-u.



*Slika 6.8 Privod Francisove turbine (predprivodeće i privodeće lopatice) izrađen u Catii*

Na slici 6.8 prikazan je privod Francisove turbine odnosno predprivodeće i privodeće lopatice izrađene u programu za 3D modeliranje Catia. Za daljnje potrebe izrade numeričke mreže te same simulacije uzet je samo jedan periodičan dio privoda odnosno jedna predprivodeća lopatica i dvije privodeće lopatice. Taj periodičan dio ima kut od  $36^\circ$  i jedan je od 10 istih periodičnih dijelova. (slika 6.9).

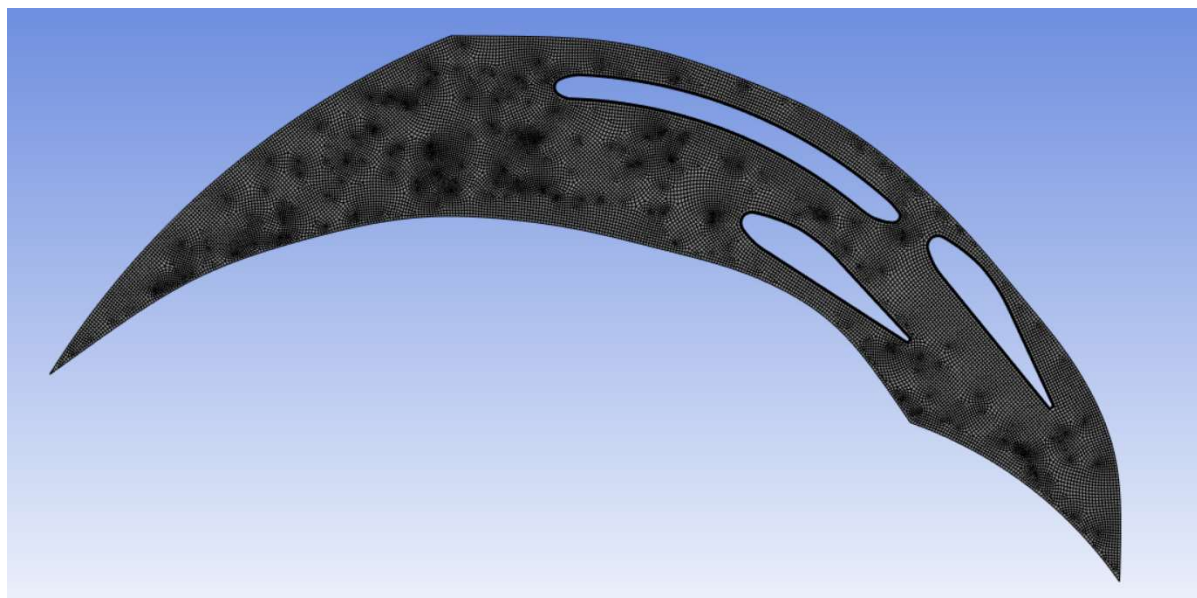


*Slika 6.9 Dio privoda izrađen u Catii*

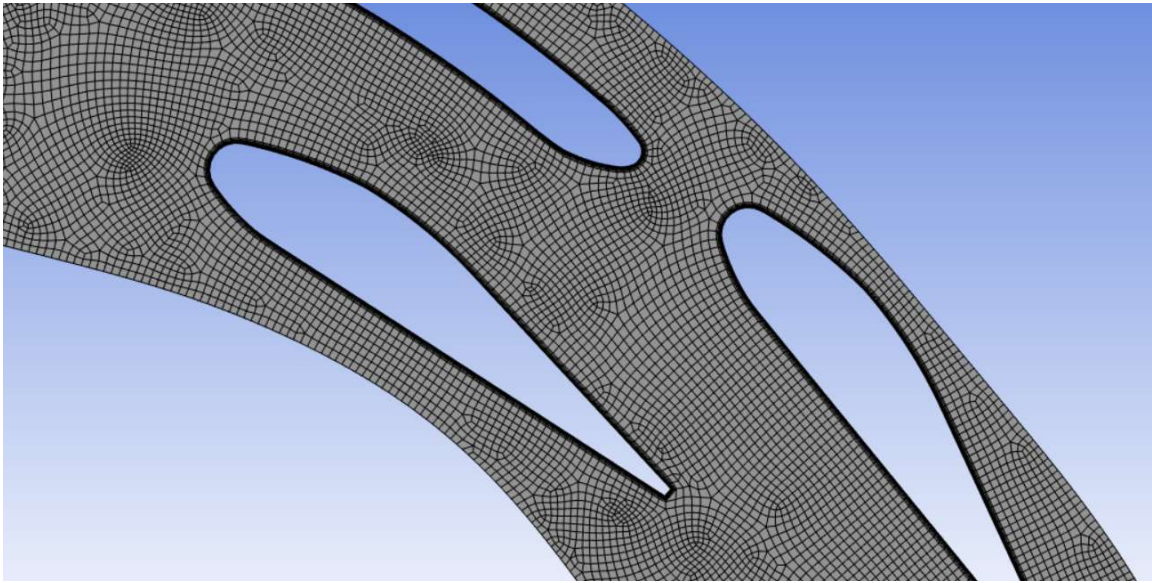
### 6.3 Izrada numeričke mreže

Za kreiranje numeričke mreže koristimo Ansys Meshing. Ansys Meshin automatski stvara numeričku mrežu. Za potrebe rješavanja zadatka potrebno je napraviti određene izmjene u početnim postavkama i parametrima kako bi se dobila što preciznija i bolja numerička mreža. Unutar Mesh-a mijenjamo preferencu iz „Mechanical“ u „CFD“, te za rješavač analize postavimo „Fluent“. Computational Fluid Dynamics (CFD) označava dobivanje podataka za protok fluida rješavanjem Navier-Stokesovih jednadžbi i stvaranja simulacije prema dobivenim rezultatima.

Za potrebe izrade numeričke mreže zadanog zadatka korišten je jedan periodičan dio privoda (jedna predprivodeća lopatica i dvije privodeće lopatice) koji je izdvojen iz cijelog privoda. Kako bi dobili što precizniju numeričku mrežu, potrebno je imati što više elemenata i čvorova. Navedeno povećanje čvorova i elemenata postizemo postavljanjem veličine elementa u području oko lopatica na 0,001 m i dodavanjem inflacije od 5 slojeva. Inflacijom se bolje opisuje ponašanje fluida u graničnom sloju. Također veličina elemenata na cijelom području je postavljena na 0,01 m. Konačno, numerička mreža ovog zadatka sastoji se od 245 290 čvorova i 214 326 elemenata.

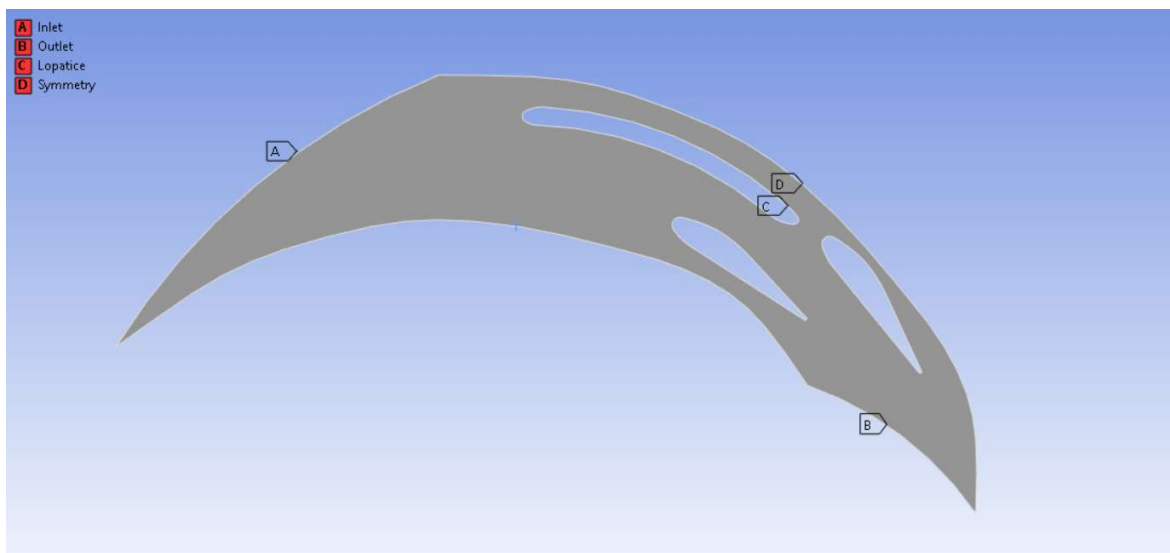


*Slika 6.10 Numerička mreža dijela potrebnog za izradu simulacije*



*Slika 6.11 Detalj numeričke mreže s prikazom inflacije*

Na slici 6.11 prikazana je detaljnije numerička mreža izdvojenog dijela privoda s prikazom inflacije oko lopatica.



*Slika 6.12 Definiranje rubnih uvjeta*

Nakon izrade numeričke mreže potrebno je definirati rubne uvjete (slika 6.12) odnosno ulaz, izlaz i rubne uvjete kako bi se mogla kreirati simulacija u Fluentu. Fluid ulazi s lijeve strane u privod (A – Inlet), a izlazi desno prema dolje odnosno prema rotoru turbine (B – Outlet).

Definirani su i rubovi odnosno stijenke odrezanog dijela privoda koji su simetrični i kasnije su tako definirane u Fluentu ( D – Symmetry). Također je kreiran uvjet za sve 3 prikazane lopatice (C – Lopatice), a to da je brzina uz samu stjenku lopatica jednaka 0 m/s.

## 6.4 Postavke numeričke simulacije

Nakon izrade numeričke mreže dolazimo do rješavanja zadatka u programu za računalnu dinamiku fluida "ANSYS Fluent". U modul „Fluent“ dodali smo numeričku mrežu izdvojenog dijela te je sada potrebno pokrenuti rješavač. Otvaranjem Fluent-a odabiremo mogućnost računanja Navier-Stokesovih jednadžbi s dvostrukom preciznošću, radi što preciznijeg dobivanja rezultata.

Također postoji mogućnost paralelnog računanja s više jezgara računala. Na taj način se ne preopterećuje računalo te se rezultat dobije još brže. To se svakako preporučuje kod većih količina elemenata u numeričkoj mreži.

Prije samog rješavanja potrebno je postaviti određene parametre. Za početak je bitan odabir turbulentnog modela. Odabran je k-epsilon turbulentni model sa dvije dodatne jednadžbe koje opisuju turbulentno strujanje. Sljedeći parametar koji treba definirati je materijal fluida. Za materijal odabiremo vodu.

Nakon odabira vode kao vrstu fluida, potrebno je definirati parametre rubnih uvjeta. Za „Inlet“ zadane su komponente brzine fluida od -16 m/s u radijalnom smjeru i -40 m/s u tangencijalnom smjeru. Na taj način se dobije da vektor na ulazu bude u smjeru lopatica. Za „Outlet“ odabiremo postavku „pressure-outlet“, gdje je definirani atmosferski tlak kao izlazni tlak.

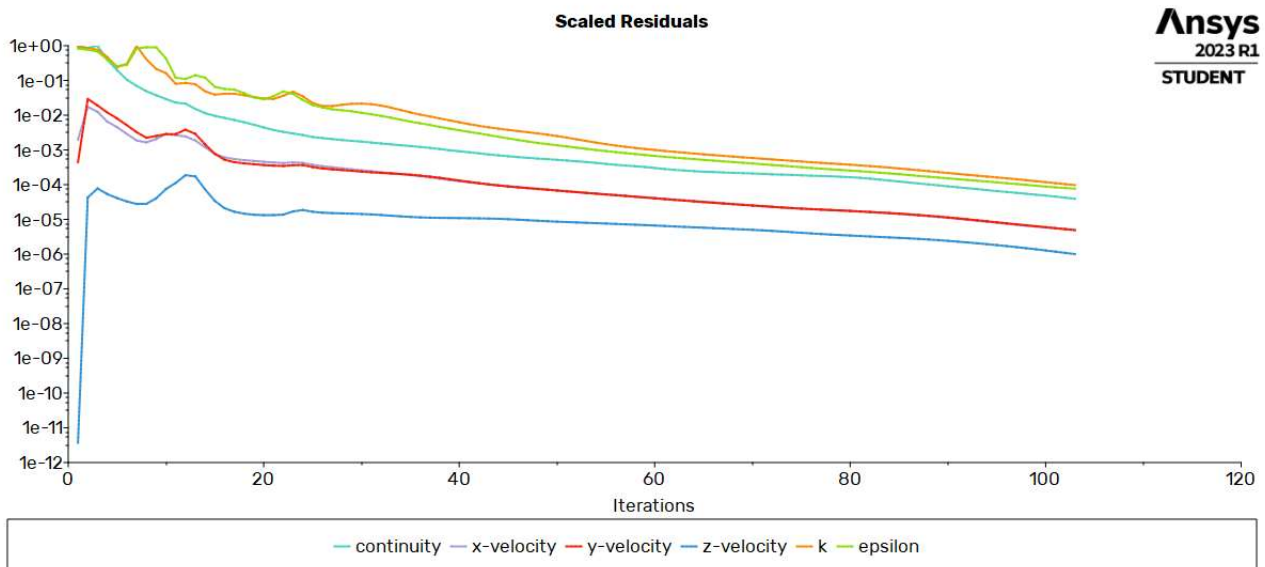
Stjenke izdvojenog dijela postavljene su na "Symmetry" odnosno da su obje simetrične i da je na njima trenje zanemareno. Također za lopatice odabiremo uvjet „Wall“ te u postavkama odabiremo opciju „No Slip“, koja definira da brzina na stjenkama samih lopatica iznosi nula.

Nakon postavljanja svih postavki i parametara definiramo inicijalizaciju proračuna s ulaznog presjeka čime se postiže namještanje proračuna prema definiranim ulaznim parametrima. Po završetku inicijalizacije postavlja se broj iteracija na 1000 i pokreće se proračun. Nakon što rješenje konvergira odnosno nakon što se svi reziduali zadovolje napravi se vizualizacija brzina strujanja fluida i usporedi se za različite položaje privodećih lopatica. U rezidualima je dodana još jedna nula (0,0001) kako bi se dobilo što bolje rješenje.

## 7 REZULTATI

Numerička analiza strujanja fluida u privodu Francisove turbine provedena je za 3 različita položaja privodećih lopatica. Prvi položaj je početni položaj privodeće lopatice u kojem je lopatica u svojem maksimalno otvorenom položaju. Sljedeći položaji su za 5 i 10 stupnjeva od maksimalnog položaja.

Nakon postavljanja svih parametara potrebnih za pokretanje izračuna, pokreće se izračun te se kreira graf konvergencije koji prikazuje hoće li rješenje konvergirati odnosno zadovoljavaju li svi reziduali kriterije koji su postavljeni početnim parametrima. Graf konvergira već nakon 103 iteracija odnosno nakon 103 iteracija svi reziduali su zadovoljeni i dobiven je grafički prikaz svih podataka.

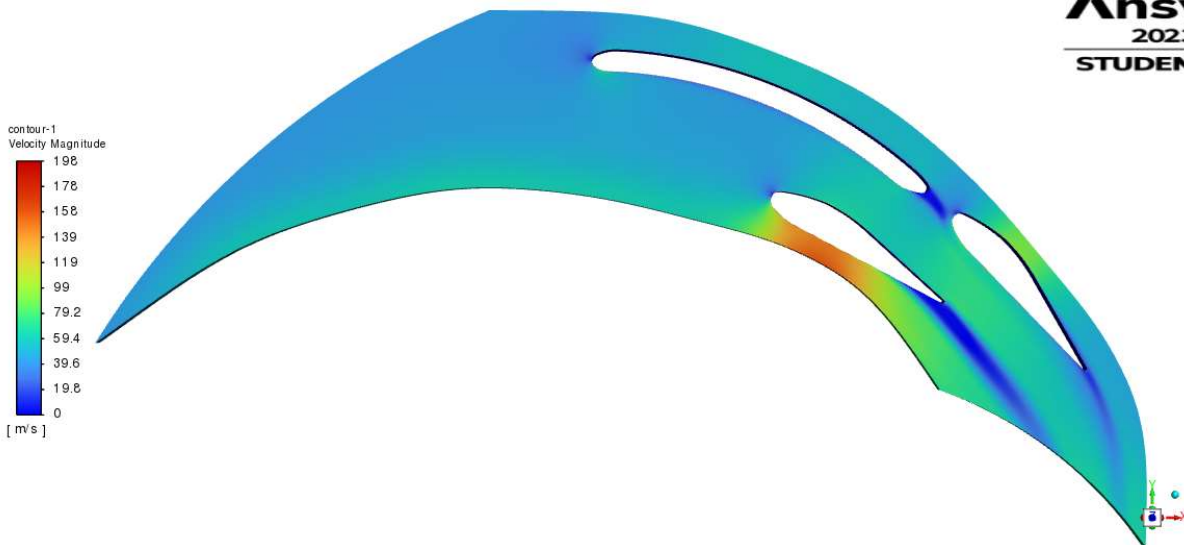


Slika 7.1 Graf konvergencije za početni položaj privodećih lopatica

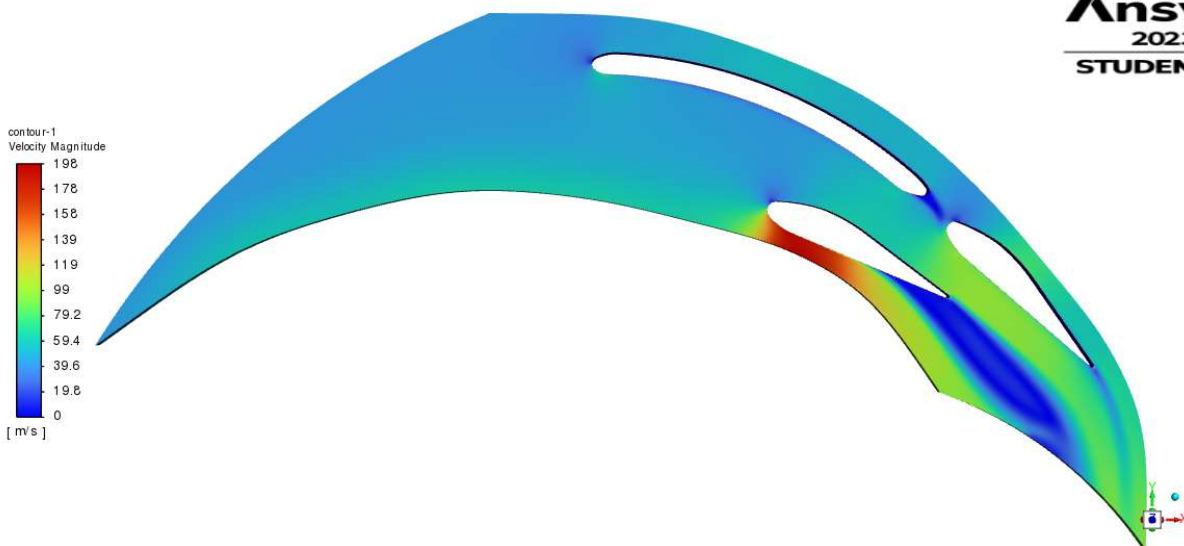
Prvo će biti prikazane konture i vektori brzina, a zatim odvojeno statički, dinamički i totalni tlak za sve navedene položaje lopatica. Također će biti prikazane strujnice brzina fluida.





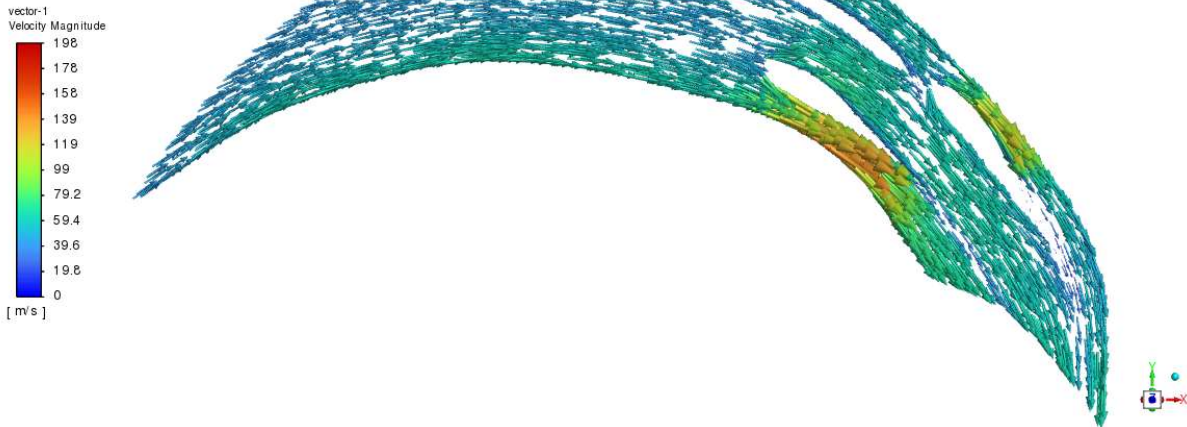


*Slika 7.3 Konture brzina za 5° od maksimalnog položaja privodećih lopatica*

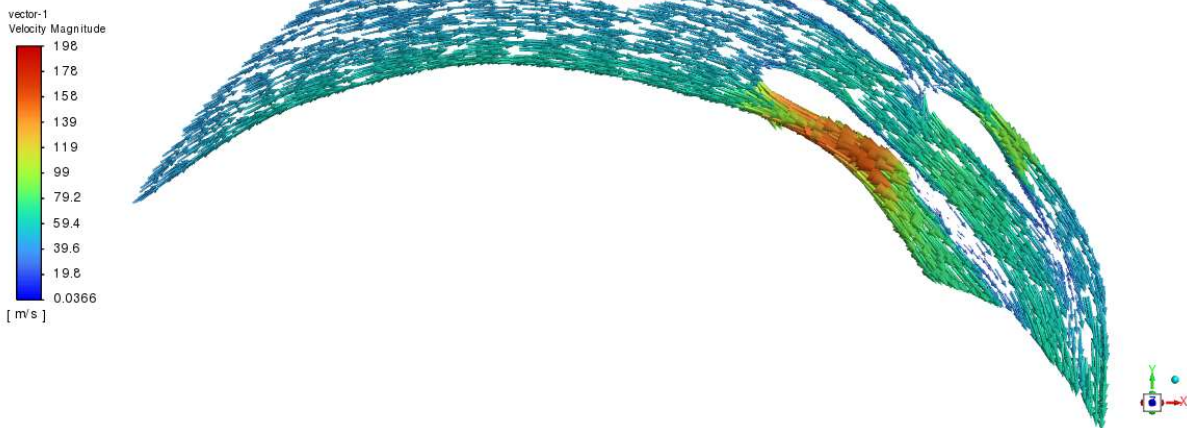


*Slika 7.4 Konture brzina za 10° od maksimalnog položaja privodećih lopatica*

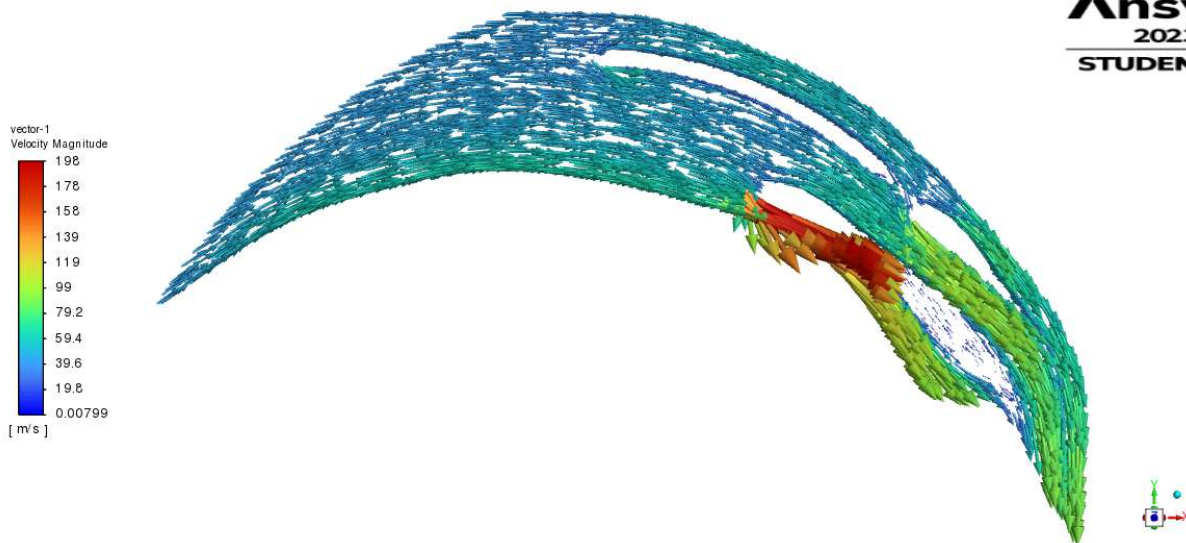
Iz slika 7.2, 7.3 i 7.4 može se zaključiti kako se fluid najbolje usmjerava prema rotoru kada je maksimalno otvoreni položaj lopatica. Tada je i najveći protok kroz cijeli privod..



*Slika 7.5 Vektori brzina za maksimalno otvoreni položaj privodećih lopatica*



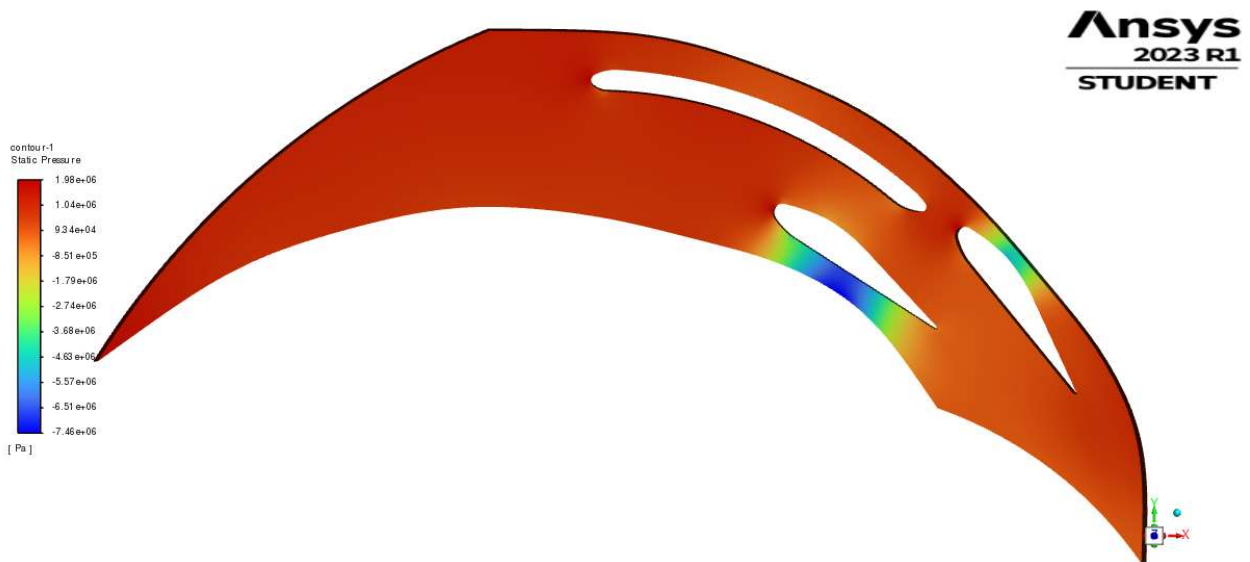
*Slika 7.6 Vektori brzina za 5° od maksimalnog položaja privodećih lopatica*



*Slika 7.7 Vektori brzina za 10° od maksimalnog položaja privodećih lopatica*

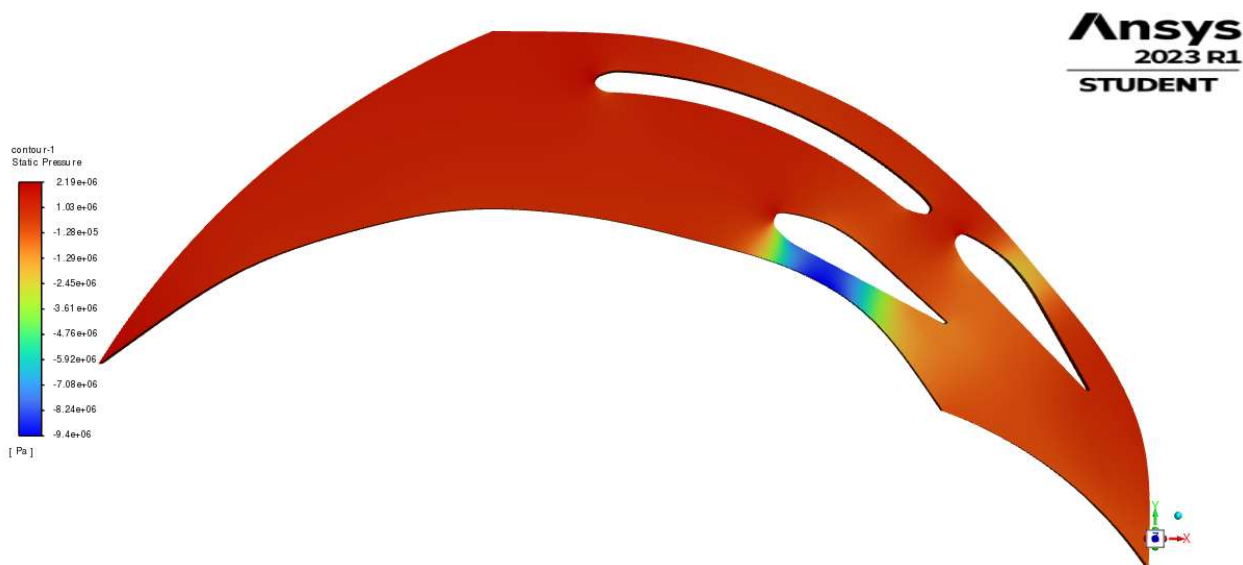
## 7.2 Statički tlak

Na slikama 7.8, 7.9 i 7.10 prikazane su konture statičkih tlakova za različite zakrete privodećih lopatica.

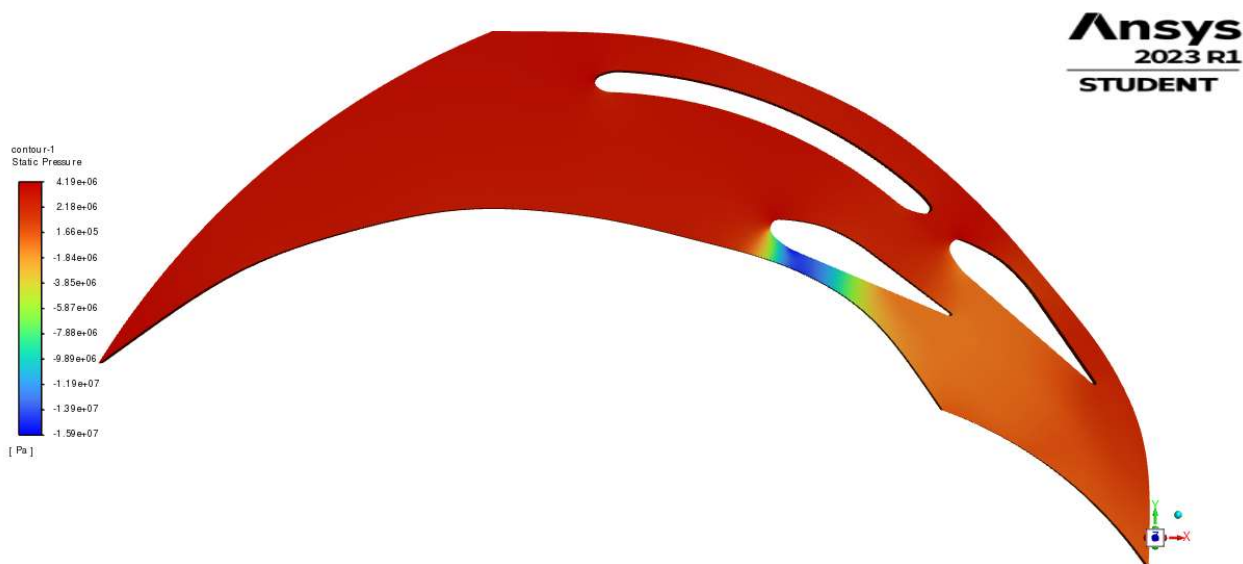


*Slika 7.8 Statički tlak za maksimalno otvoreni položaj privodećih lopatica*

Iz slike 7.8 vidljivo je da je najveći statički tlak na ulazu u privod odnosno kada fluid tek ulazi prema lopaticama jer je tada brzina fluida najmanja. Povećanjem brzine smanjuje se statički tlak odnosno na području gdje je brzina najveća statički tlak je najmanji.



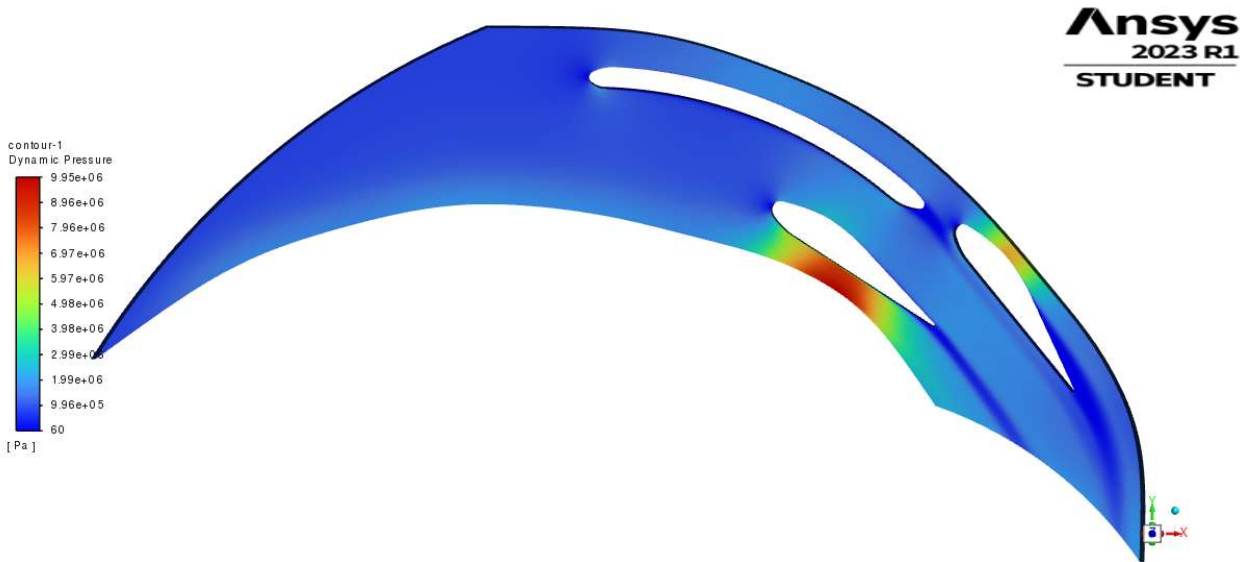
*Slika 7.9 Statički tlak za 5° od maksimalnog položaja privodećih lopatica*



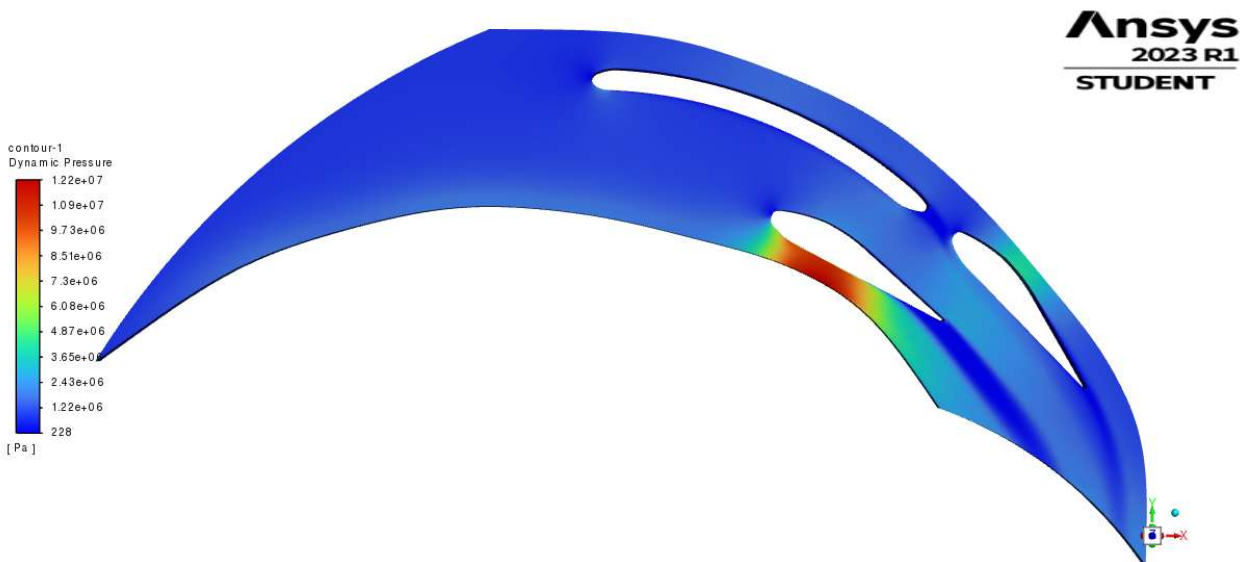
*Slika 7.10 Statički tlak za 10° od maksimalnog položaja privodećih lopatica*

### 7.3 Dinamički tlak

Na slikama 7.11, 7.12 i 7.13 prikazane su konture dinamičkih tlakova za različite zakrete privodećih lopatica.

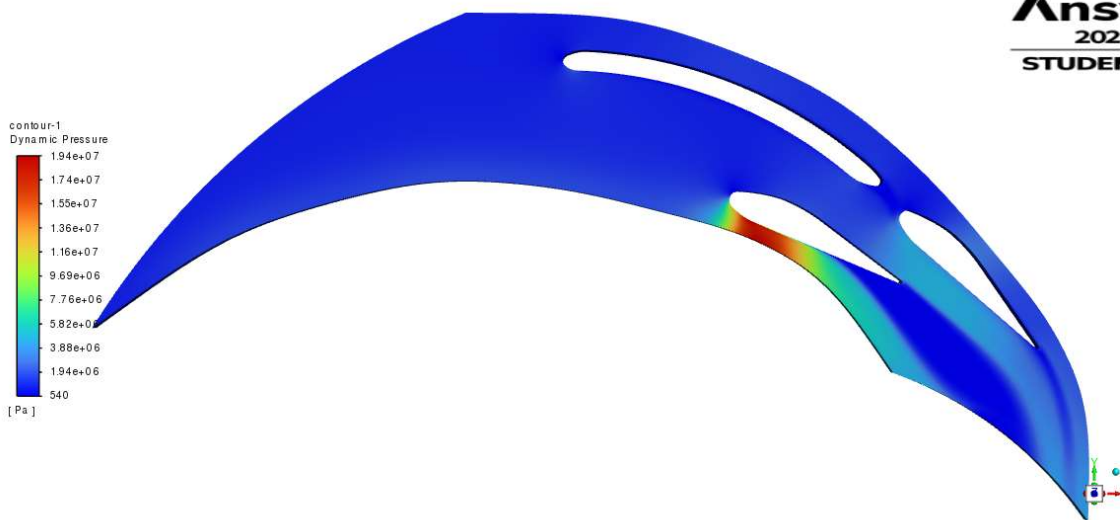


Slika 7.11 Dinamički tlak za maksimalno otvoreni položaj privodećih lopatica



Slika 7.12 Dinamički tlak za 5° od maksimalnog položaja privodećih lopatica



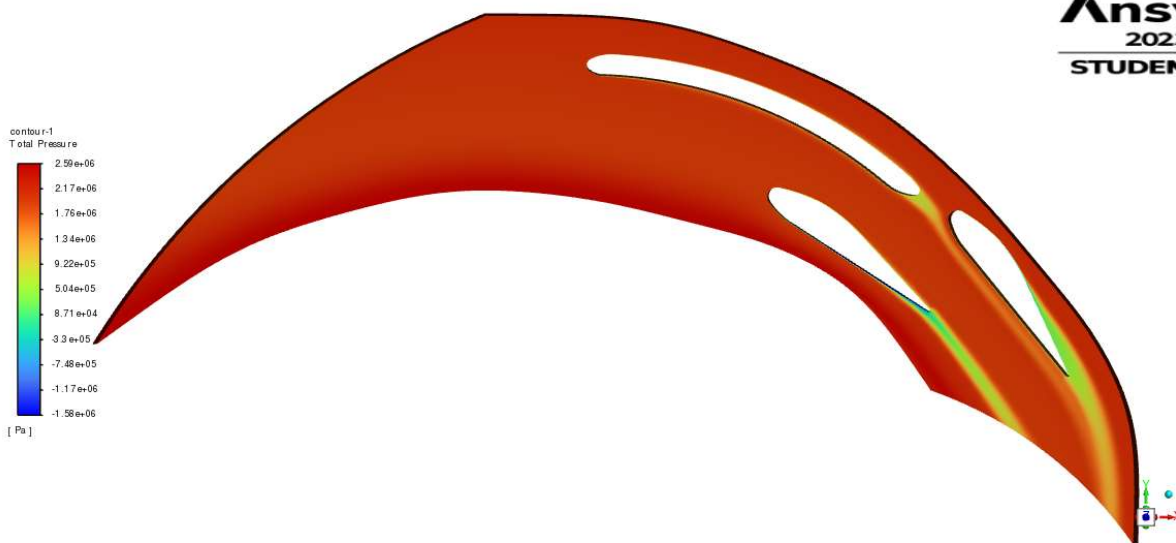


*Slika 7.13 Dinamički tlak za 10° od maksimalnog položaja privodećih lopatica*

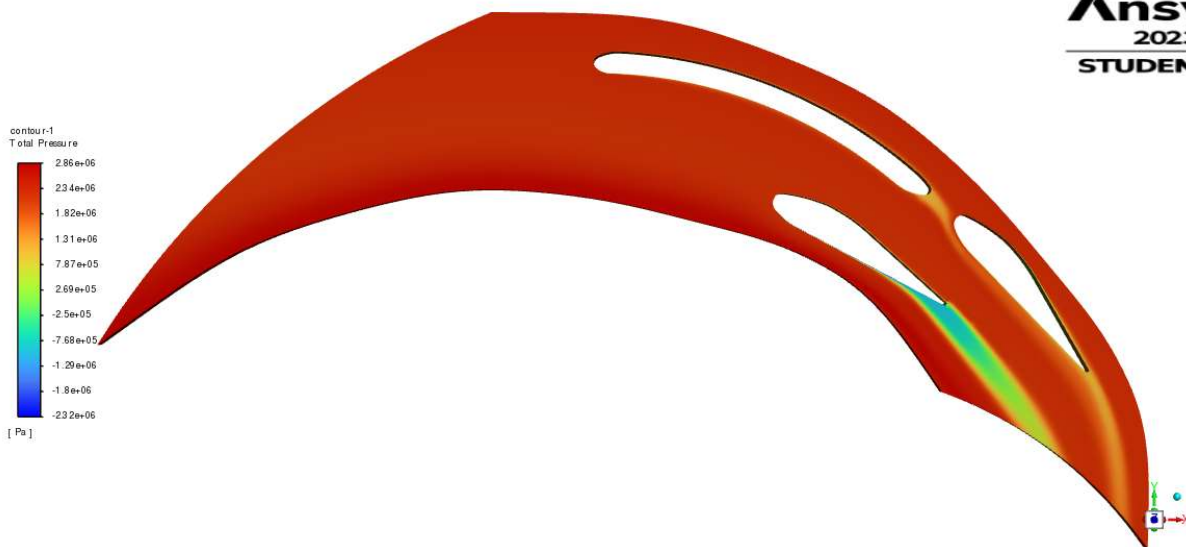
Iz slika 7.11, 7.12 i 7.13. vidljivo je kako je dinamički tlak najmanji na području gdje je brzina strujanja fluida najmanja. Povećanjem brzine strujanja dinamički tlak se povećava odnosno na području gdje je najveća brzina strujanja fluida dinamički tlak je najveći.

#### 7.4 Totalni tlak

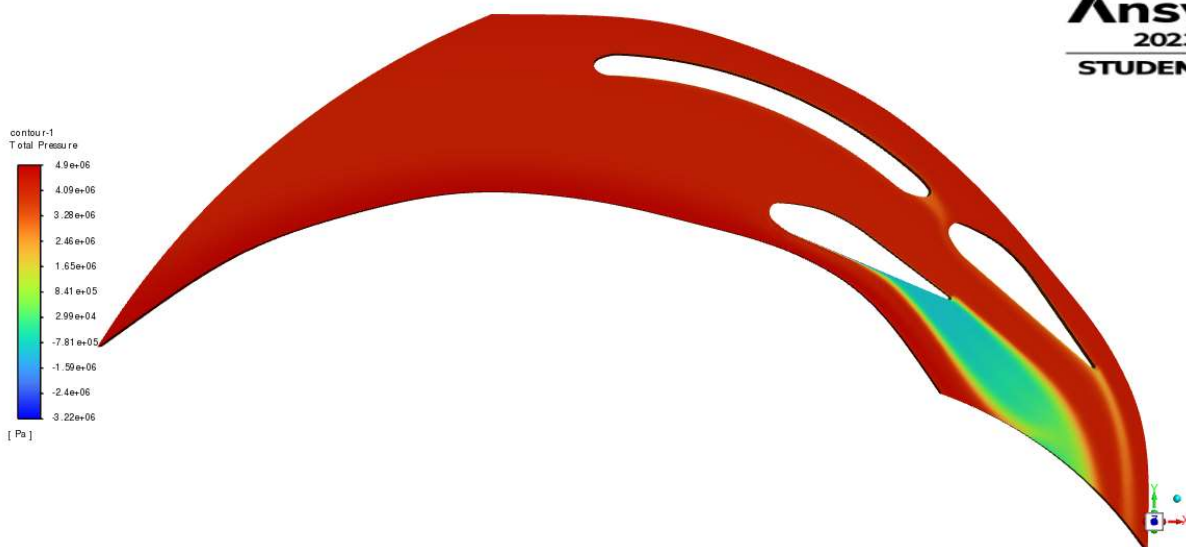
Na slikama 7.11, 7.12 i 7.13 prikazane su konture totalnih tlakova za različite zakrete privodećih lopatica.



*Slika 7.14 Totalni tlak za maksimalno otvoreni položaj privodećih lopatica*



*Slika 7.15 Totalni tlak za 5° od maksimalnog položaja privodećih lopatica*

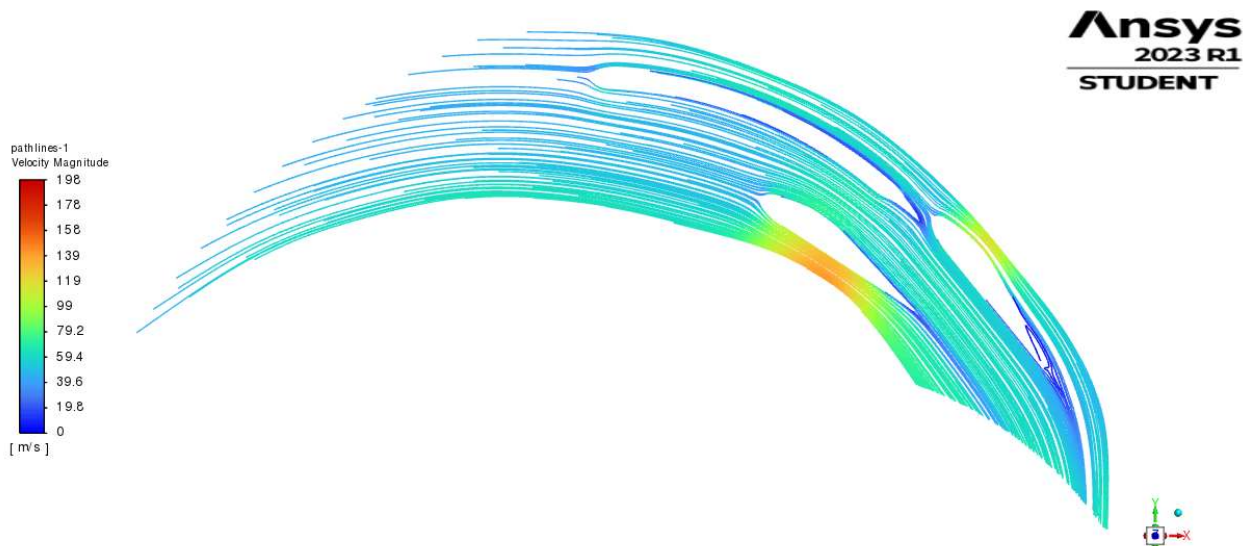


*Slika 7.16 Totalni tlak za 10° od maksimalnog položaja privodećih lopatica*

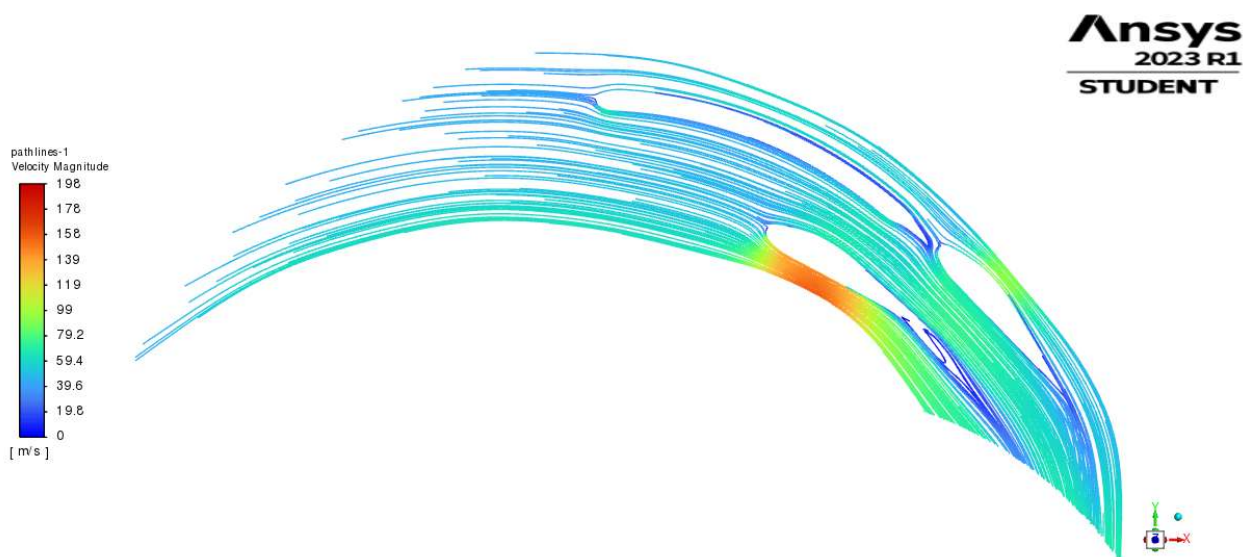
Iz slika 7.14, 7.15 i 7.16 vidljivo je kako je totalni tlak jednak skoro na cijelom području strujanja fluida. Totalni tlak je najmanji na području gdje su i statički i dinamički tlak najmanji jer je totalni tlak suma tih tlakova. Područja najmanjeg totalnog tlaka su područja nakon privodećih lopatica.

## 7.5 Strujnice brzina

Na slikama 7.17, 7.18. i 7.19 prikazane su strujnice čestica vode za sve 3 položaje lopatica

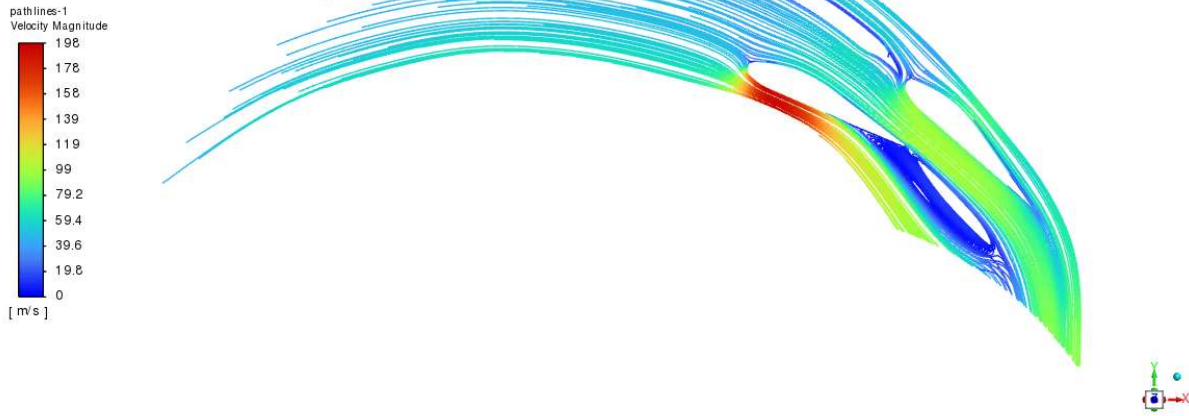


Slika 7.17 Strujnice brzina za maksimalno otvoreni položaj privodećih lopatica



Slika 7.18 Strujnice brzina za 5° od maksimalnog položaja privodećih lopatica





*Slika 7.19 Strujnice brzina za 10° od maksimalnog položaja privodećih lopatica*

## 8 ZAKLJUČAK

Zadatak ovog rada bio je napraviti numeričku analizu strujanja fluida u privodu Francisove turbine. Na početku odnosno u prvom dijelu samog rada prikazan je teorijski pregled vodnih turbina i sama podjela istih. Nakon toga opisana je Francisova turbina sa svim svojim dijelovima, glavnim karakteristikama, načinom rada i primjerima. Nakon teorijskih osnova kreirana je geometrija potrebna za izradu same simulacije. Prvo je kreiran cijeli privod u 2D-u te se za potrebe simulacije izdvojio samo jedan periodičan dio koji se sastoji od jedne predprivodeće i dvije privodeće lopatice. Nakon što se kreirala geometrija, kreirana je numerička mreža i sama simulacija geometrije. Kreirani su slučajevi u kojima su privodeće lopatice u potpunosti otvorene, 5 stupnjeva od maksimalnog položaja i 10 stupnjeva od maksimalnog položaja. Nakon provedenih simulacija dobivena su rješenja te su analizirani rezultati. Analizom rezultata prikazane su konture i vektori brzina te konture različitih tlakova kao što su statički, dinamički i totalni tlak. Konture su prikazale međusobnu zavisnost tlaka i brzine. Pri većim brzinama statički tlak bio je manji, a dinamički veći. Može se zaključiti da je najbolji položaj privodećih lopatica onaj početni odnosno maksimalno otvoreni jer tada prolazi najveća količina fluida i turbina daje najveću snagu. Također rotorske lopatice dizajnirane su baš za takav položaj privodećih lopatica. Za bolje rezultate svakako bi bilo bolje da je kreiran cijeli privod turbine uz spiralu te rotorske lopatice i difuzor. To je svakako puno kompleksnija i zahtjevnija geometrija, numerička mreža i simulacija, ali tada bi bile vidljive sve brzine i tlakovi kroz cijelu turbinu te bi se dobila puno bolja analiza. Numeričke analize i CAD programi pomažu nam da dobijemo modele turbina prije same izrade. To nam konkretno pomaže da detaljnije vidimo polja strujanja i kako bismo predvidjeli kako će se stroj ponašati te eventualna područja za poboljšanje.

## 9 LITERATURA

- [1] S interneta <https://www.hydropower.org/iha/discover-facts-about-hydropower> , 23.06.2023.
- [2] S interneta <https://www.statista.com/statistics/474526/largest-hydro-power-facilities-in-the-world-by-generating-capacity/> 23.06.2023.
- [3] Čarija, Zoran.: „Vodne turbine“, radni materijali iz kolegija “Hidraulički strojevi”, 2019.
- [4] S interneta, [https://hr.wikipedia.org/wiki/Vodna\\_turbina](https://hr.wikipedia.org/wiki/Vodna_turbina), 01. 05 2023.
- [5] S interneta [https://hr.wikipedia.org/wiki/Francisova\\_turbina](https://hr.wikipedia.org/wiki/Francisova_turbina) , 17.05.2023.
- [6] S interneta <https://www.elprocus.com/francis-turbine/> , 17.05.2023.
- [7] S interneta <https://www.hep.hr/proizvodnja/hidroelektrane-1528/pp-he-zapad/he-rijeka/1535> , 17.05.2023.
- [8] S interneta <https://www.made-in-china.com/showroom/dongsenhydropower/product-detailpwsAgWRDYzkn/China-100kw-20MW-Small-Francis-Turbine-Generator-Water-Turbine-Mini-Francis.html> , 17.05.
- [9] S interneta [https://hr.wikipedia.org/wiki/3D\\_modeliranje](https://hr.wikipedia.org/wiki/3D_modeliranje) , 17.05.2023.
- [10] S interneta <https://hr.wikipedia.org/wiki/CAD> , 17.05.2023.
- [11] S interneta <https://www.3ds.com/products-services/catia/> , 17.05.2023.
- [12] S interneta <https://hrcak.srce.hr/file/41649> , 25.05.2023.
- [13] S interneta [https://hr.wikipedia.org/wiki/Ra%C4%8Dunalna\\_dinamika\\_fluida](https://hr.wikipedia.org/wiki/Ra%C4%8Dunalna_dinamika_fluida) , 25.05.2023.
- [14] S interneta <https://www.cadfem.net/en/shop/ansys-simulation-software/ansys-fluid-dynamics/ansys-cfd-16207.html> , 25.05.2023.
- [15] S interneta [https://hr.wikipedia.org/wiki/Hidroelektrane\\_u\\_Hrvatskoj](https://hr.wikipedia.org/wiki/Hidroelektrane_u_Hrvatskoj) , 02.07.2023.
- [16] S interneta <https://www.britannica.com/topic/Three-Gorges-Dam> , 02.07.2023.

## 10 POPIS SLIKA

Slika 2.1 Najveća hidroelektrana na svijetu – Tri klanca, Kina [2] .....	4
Slika 3.1 Vodeničko kolo [4] .....	5
Slika 3.2 Primjer vodne turbine [4].....	6
Slika 4.1 Primjer Francisove turbine [8].....	7
Slika 4.2 Hidroelektrana Rijeka [7] .....	9
Slika 5.1 Neki tipovi 2D numeričke mreže: a. regularna ortogonalna; b. neregularna strukturirana; c. nestrukturirana [12].....	11
Slika 5.2 Primjer CFD simulacije [14].....	12
Slika 6.1 Oblik predprivodeće lopatice u privodu turbine .....	14
Slika 6.2 Nacrt privoda turbine sa svim pozicijama i dimenzijama.....	15
Slika 6.3 Predprivodeća lopatica izrađena u Catii .....	15
Slika 6.4 Nacrt privodeće lopatice .....	16
Slika 6.5 Bokocrt privodeće lopatice .....	17
Slika 6.6 Presjek privodeće lopatice .....	17
Slika 6.7 Privodeća lopatica izrađena u Catii .....	18
Slika 6.8 Privod Francisove turbine (predprivodeće i privodeće lopatice) izrađen u Catii .....	18
Slika 6.9 Dio privoda izrađen u Catii.....	19
Slika 6.10 Numerička mreža dijela potrebnog za izradu simulacije.....	20
Slika 6.11 Detalj numeričke mreže s prikazom inflacije .....	21
Slika 6.12 Definiranje rubnih uvjeta .....	21
Slika 7.1 Graf konvergencije za početni položaj privodećih lopatica.....	24
Slika 7.2 Konture brzina za maksimalno otvoreni položaj privodećih lopatica .....	25
Slika 7.3 Konture brzina za 5° od maksimalnog položaja privodećih lopatica .....	26
Slika 7.4 Konture brzina za 10° od maksimalnog položaja privodećih lopatica .....	26
Slika 7.5 Vektori brzina za maksimalno otvoreni položaj privodećih lopatica .....	27

Slika 7.6 Vektori brzina za 5° od maksimalnog položaja privodećih lopatica .....	27
Slika 7.7 Vektori brzina za 10° od maksimalnog položaja privodećih lopatica .....	28
Slika 7.8 Statički tlak za maksimalno otvoreni položaj privodećih lopatica .....	28
Slika 7.9 Statički tlak za 5° od maksimalnog položaja privodećih lopatica .....	29
Slika 7.10 Statički tlak za 5° od maksimalnog položaja privodećih lopatica .....	29
Slika 7.11 Dinamički tlak za maksimalno otvoreni položaj privodećih lopatica.....	30
Slika 7.12 Dinamički tlak za 5° od maksimalnog položaja privodećih lopatica .....	30
Slika 7.13 Dinamički tlak za 10° od maksimalnog položaja privodećih lopatica .....	31
Slika 7.14 Totalni tlak za maksimalno otvoreni položaj privodećih lopatica.....	31
Slika 7.15 Totalni tlak za 5° od maksimalnog položaja privodećih lopatica.....	32
Slika 7.16 Totalni tlak za 10° od maksimalnog položaja privodećih lopatica.....	32
Slika 7.17 Strujnice brzina za maksimalno otvoreni položaj privodećih lopatica.....	33
Slika 7.18 Strujnice brzina za 5° od maksimalnog položaja privodećih lopatica.....	33
Slika 7.19 Strujnice brzina za 10° od maksimalnog položaja privodećih lopatica.....	34

## 11 SAŽETAK

U ovome radu provedena je numerička analiza strujanja fluida u privodu Francisove turbine. Prvo je bilo potrebno kreirati geometriju privoda u programu za 3D modeliranje Catia iz nacrtu zadanih u CAD programu AutoCAD. Zadane su dimenzije predprivodećih i privodećih lopatica koje su korištene za izradu 3D modela. Nakon izrade 3D modela lopatica upotrebljene su skice istih za kreiranje privoda. Nakon izrade cijelog privoda izdvojen je samo jedan periodičan dio (jedna predprivodeća i dvije privodeće lopatice) za prikaz simulacije strujanja fluida kroz lopatice. Nakon izrade same geometrije kreirana je numerička mreža i simulacija za istu u programu za računalnu dinamiku fluida ANSYS Fluent. Konačno su svi rezultati izloženi i uspoređeni za različite položaje otvorenosti privodećih lopatica.

Ključne riječi: Francisova turbina, 3D modeliranje, CAD, numerička analiza

## **12 ABSTRACT**

In this thesis, a numerical analysis of the fluid flow in the inlet of the Francis turbine has been conducted. First, it was necessary to create the geometry of the inlet in the 3D modeling program Catia from the drawings given in the CAD program AutoCAD. The dimensions of the stay and guide vanes used to create the 3D model were given. After creating a 3D model of the vanes, sketches of them were used to create the entire inlet. After making the entire inlet, only one periodic part (one stay vane and two guide vanes) was cut to show the simulation of fluid flow through the vanes. After creating the geometry itself, a mesh and simulation for it was created in the computer fluid dynamics program ANSYS Fluent. Finally, all the results are presented and compared for different positions of the leading vanes.

Keywords: Francis turbine, 3D modeling, CAD, numerical analysis