

# NUMERIČKA ANALIZA STRUJANJA FLUIDA U SPIRALNOM KUĆIŠTU FRANCISOVE VODNE TURBINE TIP 3

---

**Leskovar, Loren**

**Master's thesis / Diplomski 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:190:735030>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-04**



*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

**NUMERIČKA ANALIZA STRUJANJA FLUIDA U SPIRALNOM  
KUĆIŠTU FRANCISOVE VODNE TURBINE TIP 3**

Rijeka, rujan 2024.

Loren Leskovar

0229047609

SVEUČILIŠTE U RIJECI

**TEHNIČKI FAKULTET**

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

**NUMERIČKA ANALIZA STRUJANJA FLUIDA U SPIRALNOM  
KUĆIŠTU FRANCISOVE VODNE TURBINE TIP 3**

Mentor: prof. dr. sc. Zoran Čarija

Rijeka, rujan 2024.

Loren Leskovar

0229047609

Rijeka, 14. ožujka 2023.

Zavod: **Zavod za mehaniku fluida i računarsko inženjerstvo**  
Predmet: **Računarska dinamika fluida**  
Grana: **2.15.04 mehanika fluida**

## ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Loren Leskovar (0229047609)**  
Studij: **Sveučilišni diplomski studij strojarstva**  
Modul: **Računarska mehanika i inženjerstvo**

Zadatak: **Numerička analiza strujanja fluida u spiralnom kućištu Francisove vodne turbine tip 3 / Fluid flow numerical analysis in Francis turbine spiral case type 3**

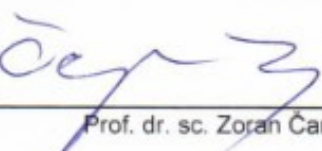
### Opis zadatka:

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:

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

Predsjednik povjerenstva za  
diplomski ispit:

  
\_\_\_\_\_  
Izv. prof. dr. sc. Igor Bonefačić



## IZJAVA

Izjavljujem da sam diplomski rad naslova „Numerička analiza strujanja fluida u spiralnom kućištu Francisove vodne turbine tipa 3” izradio samostalno pod vodstvom mentora prof. dr. sc. Zorana Čarije uz pomoć navedene literature.

Rijeka, rujan 2024.

Loren Leskovar

---

## ZAHVALA

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Zoranu Čariji te vanjskom suradniku RITEH-a Anti Sikirici na redovitoj dostupnosti, savjetima i pomoći tokom izrade ovoga rada. Zahvaljujem se i asist. Ivani Lučin na uloženom trudu za davanje brojnih komentara kako bi se ovaj rad učinio boljim. Također, rad ne bi bio moguć bez savjeta drage kolegice Lorene Slišković i kolega Emila Weiganda i Josipa Jovića.

# SADRŽAJ

Sadržaj.....	6
1. Uvod.....	1
1.1 Računalna dinamika fluida.....	1
1.2 Modeliranje strujanja fluida .....	1
1.3 Dodatne jednačbe gibanja fluida .....	3
1.4 Postupak numeričkih simulacija.....	3
1.5 Značaj numeričkih simulacija i primjer simulacija na vodenoj turbini.....	4
1.6 Strukturirane mreže .....	5
1.7 Nestrukturirane mreže .....	6
2. Turbinski strojevi .....	7
2.1 Uvod.....	7
2.2 Klasifikacija turbina .....	8
2.3 Impulsne turbine.....	8
1.3.1 Peltonova turbina.....	9
2.3.2 Turbina s poprečnim protokom .....	10
2.4 Reakcijske turbine .....	10
2.4.1 Francisova turbina .....	10
2.5 Efficiency hill vodene turbine (školjkasti dijagram .....	11
2.6 Trokut brzina i protok vode u turbini .....	13
2.7 Protok kroz Francisovu turbinu.....	15
3. Geometrija.....	16
3.1 Crtanje spirale i predprivodećih lopatica .....	19
3.2 Crtanje predprivodećih lopatica .....	21
4. Domena i numerička mreža.....	23

4.1 Ansys ICEM.....	23
4.2 Kreiranje numeričke mreže .....	23
5. Numerička analiza.....	33
5.1 Spajanje domena .....	33
5.2 Postavke numeričke analize .....	34
6. Vizualizacija rezultata .....	36
6.1 Vizualizacija rezultata za položaj privodećih lopatica od 4° .....	36
6.2 Vizualizacija rezultata za položaj privodećih lopatica od 6° .....	41
6.3 Vizualizacija rezultata za položaj privodećih lopatica od 8° .....	45
6.4 Vizualizacija rezultata za položaj privodećih lopatica od 10° .....	49
6.5 Vizualizacija rezultata za položaj privodećih lopatica od 12° .....	54
6.6 Vizualizacija rezultata za položaj privodećih lopatica od 14° .....	61
6.7 Vizualizacija rezultata za položaj privodećih lopatica od 16° .....	66
6.8 Vizualizacija rezultata za položaj privodećih lopatica od 18° .....	71
6.9 Vizualizacija rezultata za položaj privodećih lopatica od 20° .....	75
6.10 Simulacija sa fiksnim protokom.....	81
6.11 Rezultati .....	81
7. Zaključak.....	85
8. Literatura .....	86
Sažetak .....	87
Abstract .....	87

# 1. UVOD

## 1.1 Računalna dinamika fluida

Računalna dinamika fluida (na engleskom – computational fluid dynamics, CFD) grana je mehanike fluida koja se fokusira na numeričku simulaciju i analizu protoka fluida i fenomena prijenosa topline. Računalna dinamika fluida uključuje korištenje računalnih metoda i algoritama za rješavanje vladajućih jednadžbi dinamike fluida, a to su Navier-Stokesove jednadžbe za protok fluida i jednadžbe prijenosa topline za toplinsku analizu. CFD omogućuje inženjerima, znanstvenicima i istraživačima proučavanje i predviđanje ponašanja fluida (tekućina i plinova) u različitim scenarijima bez potrebe za fizičkim eksperimentima.

Stvaranjem virtualnog modela domene fluida i primjenom odgovarajućih rubnih uvjeta, CFD softver može izračunati i vizualizirati uzorke protoka fluida, distribucije tlaka, temperaturnih polja i druge relevantne parametre.

## 1.2 Modeliranje strujanja fluida

Strujanje fluida je složena pojava koja se može opisati i analizirati pomoću različitih matematičkih modela. Jedan od najtemeljnijih i najčešće korištenih modela su Navier-Stokesove jednadžbe. Ove jednadžbe opisuju kretanje tekućih tvari odnosno fluida, uzimajući u obzir čimbenike poput viskoznosti i tlaka. Navier-Stokesove jednadžbe opisane su pomoću jednadžbi za očuvanje mase (jednadžba kontinuiteta) [1]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (1.1)$$

Očuvanje momenta (Navier-Stokesove jednadžbe):

$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla P + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \rho \mathbf{g} \quad (1.2)$$

Ovdje simboli predstavljaju sljedeće varijable:

- $\rho$ : gustoća tekućine
- $t$ : vrijeme
- $\mathbf{v}$ : vektor brzine fluida
- $P$ : pritisak
- $\mu$ : dinamička viskoznost
- $\mathbf{g}$ : ubrzanje uslijed gravitacije
- $\nabla$ : nabra operator koji predstavlja gradijent skalarnog polja ili divergenciju vektorskog polja.

Ove jednačbe su parcijalne diferencijalne jednačbe (PDE) koje opisuju kako se brzina i tlak tekućine mijenjaju tijekom vremena i prostora. Analitičko rješavanje Navier-Stokesovih jednačbi često je izazovno i zahtijeva pojednostavljenje pretpostavki za specifične slučajeve. U mnogim praktičnim situacijama, numeričke metode i tehnike računalne dinamike fluida koriste se za rješavanje ovih jednačbi i simulaciju ponašanja protoka fluida.

Uz Navier-Stokesove jednačbe, postoje i drugi modeli i jednačbe koje mogu opisati specifične aspekte protoka fluida, kao što su:

- Eulerove jednačbe: to su pojednostavljene verzija Navier-Stokesovih jednačbi koje zanemaruju učinke viskoznosti. Koriste se za modeliranje neviscidnog strujanja.
- Bernoullijeva jednačba: opisuje očuvanje energije duž strujnice u neviskoznom, nestlačivom strujanju.
- Reynolds-Averaged Navier-Stokesove (RANS) jednačbe: usrednjena verzija Navier-Stokesovih jednačbi koje se koriste u modeliranju turbulencije.
- Jednačbe laminarnog strujanja: pojednostavljene jednačbe koje se koriste za opisivanje situacija laminarnog (neturbulentnog) strujanja.
- Modeli turbulencije: Razni modeli koji imaju za cilj uhvatiti turbulentno ponašanje protoka dodavanjem članova zatvaranja Navier-Stokesovim jednačbama. Primjeri uključuju  $k-\epsilon$  model i simulaciju velikih vrtloga (LES – large eddy simulation).

Ovi matematički modeli, zajedno s eksperimentalnim podacima, pomažu inženjerima i znanstvenicima u razumijevanju i predviđanju ponašanja protoka fluida u raznim primjenama, kao što su zrakoplovstvo, inženjerstvo, znanost o okolišu i još mnogo toga.

### **1.3 Dodatne jednađbe gibanja fluida**

Ako je u problemu važna pretvorba energije ili prijenos topline, druga transportna jednađba, jednađba energije, također se mora riješiti [2].

Ako temperature razlike dovode do značajih promjena u gustoći, koristi se jednađba stanja (kao što je zakon idealnog plina).

Ako je uzgon važan, učinak temperatura na gustoću odražava se u gravitacijskom izrazu.

Za zadani skup rubnih uvjeta, CFD rješenje laminarnog toka približava se "točnom" rješenju, ograničenom samo točnošću diskretizacije shema koja se koristi za jednađbe gibanja, razina konvergencije, i stupanj do kojeg je mreža razriješena. Isto bi vrijedilo i za simulacije turbulentnog toka ako bi mreža mogla biti dovoljno fina da se razriješe svi nestabilni, trodimenzionalni turbulentni vrtlozi. Nažalost, ovakva izravna simulacija turbulentnog strujanja obično nije moguća za praktično inženjerstvo aplikacije zbog ograničenja snage računala.

Umjesto toga, dodatne aproksimacije izrađuju se u obliku modela turbulencije tako da su rješenja turbulentnog strujanja moguća.

Modeli turbulencije generiraju dodatne transportne jednađbe koje modeliraju pojačano miješanje i difuziju turbulencije; ove dodatne jednađbe transporta moraju se riješiti zajedno s jednađbama mase i količine gibanja.

Moderni CFD kodovi uključuju opcije za izračun putanje čestica, prijenos topline i turbulencija. Kodovi su jednostavni koristiti, a rješenja se mogu dobiti bez znanja o jednađbama ili njihovih ograničenja. Ovdje leži i opasnost CFD-a, naime kada je u rukama osobe bez znanja o mehanici fluida, vjerojatnost pogrešnih rješenja je puno veća.

Od ključne je važnosti da korisnici CFD softvera posjeduju neke temelje mehanike fluida kako bi mogli razlučiti je li CFD rješenje fizički smisljeno ili nije.

### **1.4 Postupak numeričkih simulacija**

Glavni koraci uključeni u tipičnu CFD analizu su predobrada, numeričko rješenje i naknadna obrada rješenja u koje spadaju vizualizacija rješenja.

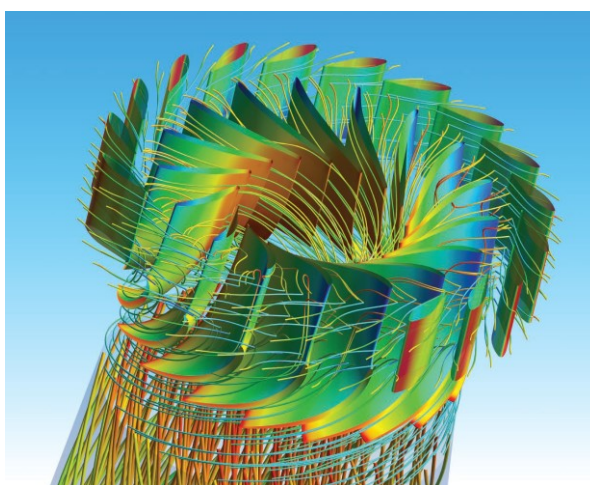
Faza predobrade uključuje definiranje geometrije domene fluida, određivanje rubnih uvjeta i odabir odgovarajućih numeričkih metoda za rješavanje vladajućih jednažbi. Geometrija je diskretizirana u mrežu malih kontrolnih volumena ili elemenata, koji čine osnovu za numeričke proračune.

Nakon toga, korištenjem tehnika diskretizacije kao što su metode konačnih razlika, konačnih elemenata ili konačnih volumena, mjerodavne jednažbe se pretvaraju u algebarske jednažbe. Te se jednažbe zatim rješavaju iterativno korištenjem numeričkih algoritama da bi se dobilo polje protoka i druga svojstva domene koja nas zanimaju. Nakon završetka simulacije, rezultati se naknadno obrađuju kako bi se vizualizirali i analizirali podaci. Različiti alati i tehnike vizualizacije koriste se za razumijevanje ponašanja fluida, identificiranje kritičnih područja i izvlačenje relevantnih inženjerskih uvida.

CFD se široko koristi u raznim inženjerskim i znanstvenim područjima, uključujući zrakoplovstvo, dizajn automobila, energetiku, analizu okoliša, biomedicinske primjene itd.

### **1.5 Značaj numeričkih simulacija i primjer simulacija na vodenoj turbini**

CFD pomaže inženjerima u optimizaciji dizajna, predviđanju performansi i razumijevanju složenih fenomena protoka koje je teško proučavati samo tradicionalnim eksperimentalnim metodama. Međutim, bitno je potvrditi CFD rezultate s eksperimentalnim podacima kada je to moguće kako bi se osigurala točnost i pouzdanost simulacija.



*Slika 1-1 Vizualizacija CFD analize hidroturbine*



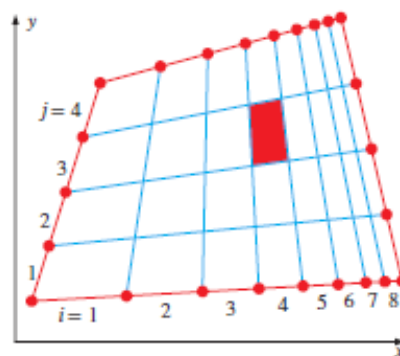
Na slici 1-1 je prikazana vizualizacija CFD analize hidroturbine, Strujnice toka, koje se mogu usporediti sa stazama kojima pojedinačne molecule vode protječu kroz turbine, prikazane su u odnosu na kutnu brzinu svake lopatice. Na taj način lako možemo vidjeti odnosno vizualizirati kako voda ulazi i izlazi iz svake komponente turbine. Konture površinskog tlaka predstavljaju statički pritisak i ukazuju na područja visokog i niskog tlaka na lopaticama.

Dok su numerički podaci o visini hidrauličkog pada, protoku, i snagi izdvojeni iz CFD modela tijekom iteracija dizajna, ovakva vrsta vizualizacije vrlo je korisna za inženjere kao kvalitativna analiza za identifikaciju područja koja su osjetljiva na kavitacijska oštećenja i neželjene vrtloge.

## 1.6 Strukturirane mreže

Strukturirana mreža sastoji se od ravnih ćelija s četiri ruba (dvodimenzionalno) ili volumetrijskih ćelija sa šest lica (trodimenzionalno).

Iako ćelije mogu biti iskrivljene od idealnog pravokutnika, svaka ćelija je numerirana prema indeksima  $(i, j, k)$  koji nužno ne odgovaraju koordinatama  $x, y$  i  $z$ . Ilustracija 2-D strukturirana mreža prikazana je na slici 1-2 [7].



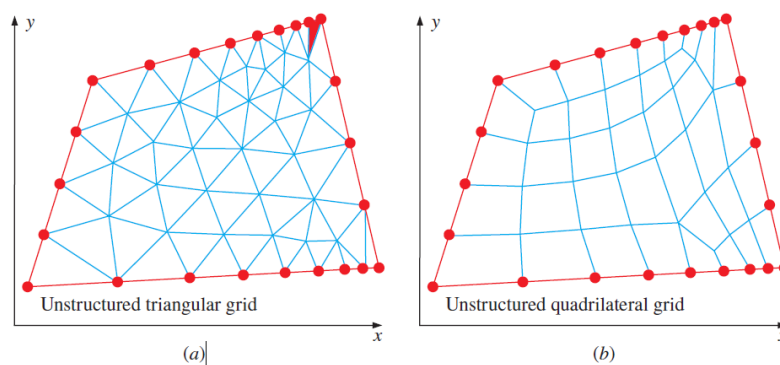
Slika 1-2 Strukturirana mreža

Za konstrukciju ove mreže, na gornjem i donjem rubu prikazano je 9 čvorova. Ti čvorovi odgovaraju osam intervala duž ovih rubova. Slično, pet čvorova navedeno je na lijevom i desnom rubu, koji predstavljaju četiri intervala duž tih rubova.

Spomenuti intervali označavaju se od  $i = 1$  do 8 i od  $j = 1$  do 4. Spajanjem se potom generira unutarnja mreža čvorova jedan za jedan preko domene tako da redovi za koje vrijedi  $j = \text{konstanta}$  i stupci za koje vrijedi  $i = \text{konstanta}$  budu jasno definirani, iako su same ćelije djelomično iskrivljene to jest ne nužno pravokutne. U dvodimenzionanim strukturiranim rešetkama, svaka je ćelija jedinstveno određena parom indeksa  $(i, j)$ . Na primjer, osjenčana ćelija na slici 1-2 ( $i = 4, j = 3$ ).

## 1.7 Nestrukturirane mreže

Nestrukturirana mreža sastoji se od ćelija različitih oblika, ali najčešće trokuta ili četverokuta (2-D) i tetraedara ili heksaedara (3-D). Za razliku od strukturirane mreže, ne postoji jedinstveni način identifikacije ćelija u nestrukturiranoj mreži pomoću indeksa  $i$  i  $j$ , stoga su ćelije interno numerirane na neki drugi način u CFD kodu. Za složene geometrije, nestrukturirana mreža je obično puno jednostavnija za stvaranje mreže. Međutim, postoje neke prednosti za strukturirane mreže. Na primjer, neki stariji CFD kodovi napisani su posebno za strukturirane mreže; ti kodovi brže konvergiraju, i često točnije, korištenjem značajke indeksa strukturiranih mreža.



Slika 1-3 Nestrukturirana mreža

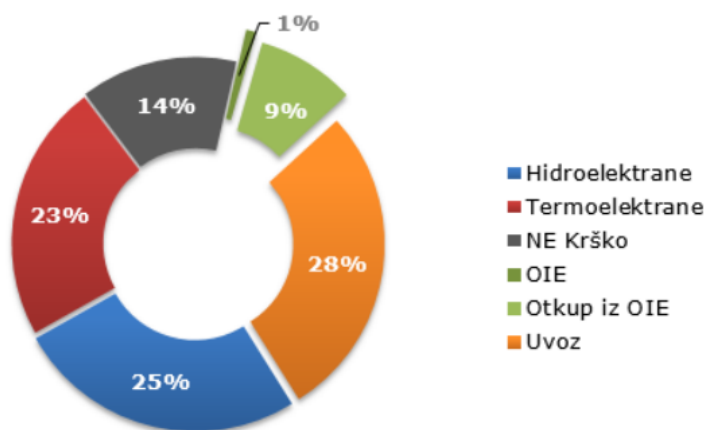
Za moderne CFD kodove opće namjene koji mogu raditi sa strukturiranim i nestrukturiranim mrežama, međutim, to više nije problem. Što je još važnije, manje ćelija se obično generira sa strukturiranom mrežom nego sa nestrukturiranom mrežom. Na slici 1-2, na primjer, strukturirana mreža ima  $8 \times 4 = 32$  ćelije, dok nestrukturirana trokutasta mreža na slici 1-3 ima 76 ćelija, a nestrukturirana mreža četverokuta ima 38 ćelija, iako se identična raspodjela čvorova na rubovima primjenjuje u sva tri slučaja.

Kod graničnih slojeva, gdje se varijable protoka brzo mijenjaju normalno na stijenku, strukturirane rešetke omogućuju mnogo bolju rezoluciju od nestrukturiranih mreža za isti broj ćelija.

## 2. TURBINSKI STROJEVI

### 2.1 Uvod

Energija je osnovni uvjet za gospodarski razvoj. Svaki sektor gospodarstva države (industrija, poljoprivreda, transport, komercijalni i domaći) ovisi o energiji. Instalirani kapacitet za proizvodnju električne energije u Hrvatskoj trenutno je gotovo 19,1 TWh proizvedene i kupljene električne energije. Struktura udjela pojedinih izvora električne energije prikazana je na Slici 2-1. Od ukupne električne energije 23% se generira kroz toplinsku energiju, 25% kroz hidro, 14% kroz nuklearnu 28% kroz uvoz i 10% kroz druge obnovljive izvore energije [8].



Slika 2-1 Udjeli generiranja električne energije u RH

Kako se neobnovljivi izvori fosilne energije nastavljaju iscrpljivati, u cilju smanjivanja efekta staklenika kao i emisije plinova, hidroenergija je jedan od idealnih i relativno po okoliš neinvazivnih načina kako bi čovječanstvo zadovoljilo sve veću potražnju za energijom.

Hidroelektrana je postrojenje u kojem se potencijalna energija vode najprije pretvara u kinetičku energiju njezinog strujanja, a potom u mehaničku energiju vrtnje vratila turbine te, konačno u električnu energiju u električnom generatoru. Hidroelektranu u širem smislu čine i sve građevine i postrojenja, koje služe za prikupljanje (akumuliranje), dovođenje i odvođenje vode (brana, zahvati, dovodni i odvodni kanali, cjevovodi itd.), pretvorbu energije (vodne turbine, generatori), transformaciju i razvod električne energije (rasklopna postrojenja, dalekovodi) te za smještaj i upravljanje cijelim sustavom (strojarnica i sl).

Iskorištavanje energije vodnog potencijala ekonomski je konkurentno proizvodnji električne energije iz fosilnih i nuklearnog goriva, zato je hidroenergija najznačajniji obnovljivi izvor energije. U zadnjih trideset godina proizvodnja u hidroelektranama je utrostručena, a njen udio povećan je za 50 %, za to je vrijeme proizvodnja u nuklearnim elektranama povećana za 100 puta, a udio oko 80 puta. Najveća hidroelektrana u Hrvatskoj, Zakučac smještena je na ušću rijeke Cetine kod Omiša i najveće je postrojenje na slivu rijeke Cetine, a isporučuje oko trećinu ukupne hidroenergije u Hrvatskoj.

Središnji dio svake hidroelektrane svakako je turbina energetska stroj koji pretvara potencijalnu energiju toka fluida u kinetičku energiju, te dalje u mehanički rad kretanja lopatica, a time i vrtnje cijelog rotora.

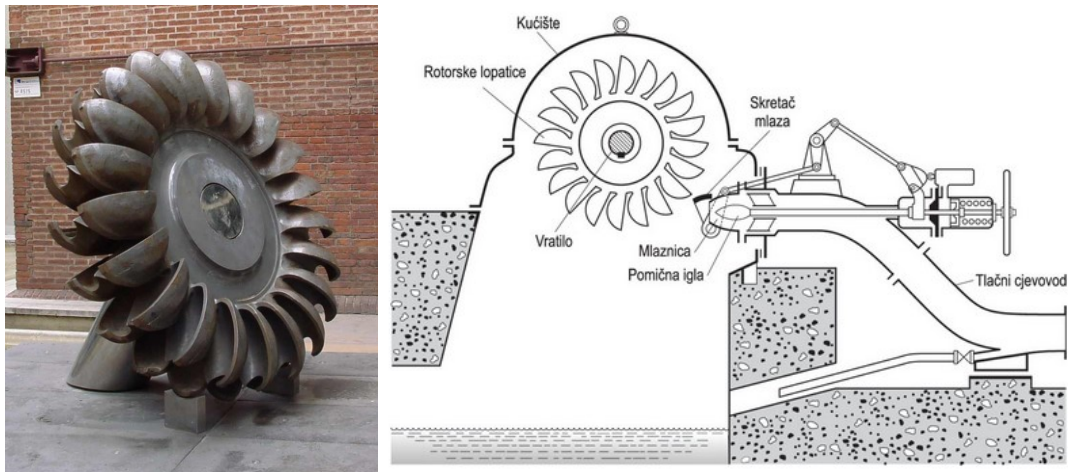
## **2.2 Klasifikacija turbina**

Hidrauličke turbine mogu se općenito klasificirati u dvije kategorije prema djelovanju vode na pokretne lopatice. Postoje dvije glavne vrste hidroenergetskih turbina: reakcijske i impulsne. Izbor turbine ovisi o čimbenicima kao što su pad (vertikalni pad vode) i protok vode u hidroelektričnom sistemu.

## **2.3 Impulsne turbine**

Impulsna turbina općenito koristi brzinu vode za pokretanje radnog kola i pražnjenja pri atmosferskom tlaku. Mlaz vode udara u svaku lopaticu na vodenom kolu. Bez usisavanja na donjoj strani turbine, voda istječe s dna kućišta turbine nakon što udari u klip. Impulsna turbina općenito je prikladna u okolini s visokim tlakom i niskim protokom. Dvije glavne vrste impulsne turbine su Peltonove turbine i turbine s poprečnim protokom.

### 1.3.1 Peltonova turbina



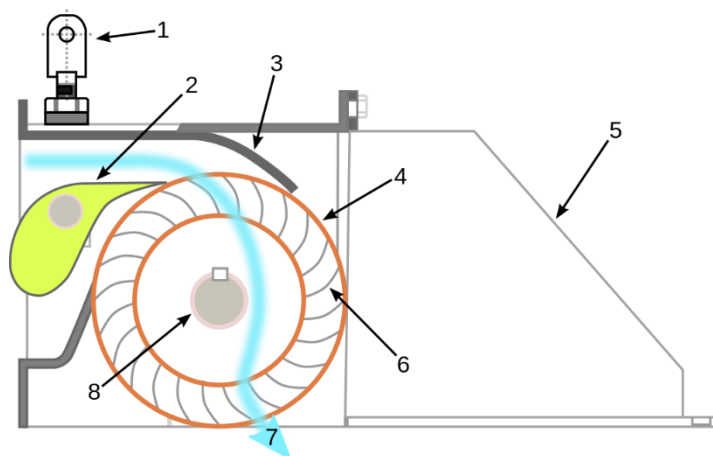
*Slika 2-2 Peltonova turbina i shematski prikaz*

Peltonova turbina je impulsna turbina za velike geodetske padove vode (od 300 do 1700 m), razmjerno male protoke, snage do 250 MW [3].

Peltonov kotač ima jedan ili više slobodnih mlaznica koje ispuštaju vodu u prozračeni prostor i udaraju lopatice radnog kola. Peltonove turbine općenito se koriste za vrlo visoke padove i niske protoke. Odsisne cijevi nisu potrebne za impulsnu turbinu jer se radno kolo mora nalaziti iznad maksimalne otpadne vode kako bi se omogućio rad pri atmosferskom tlaku.

Peltonove turbine su izuzetno efikasne i pogodne za planinske regije sa strmim padovima te se često koriste u malim ili mikrohidroelektranama.

### 2.3.2 Turbina s poprečnim protokom



Slika 2-3 Shematski prikaz turbine s poprečnim protokom

Turbina s poprečnim protokom ima oblik bubnja i koristi mlaznicu izduženog pravokutnog presjeka usmjerenu prema zakrivljenim lopaticama na klizaču cilindričnog oblika.

Turbina s poprečnim protokom omogućuje strujanje vode kroz lopatice čak dva puta. Pri prvom prolazu voda teče s vanjske strane lopatica prema unutra; drugi prolaz ide iz unutarnje strane natrag prema van. Vodeća lopatica na ulazu u turbinu usmjerava protok u ograničeni dio radnog kola. Turbina s križnim protokom razvijena je za rad pri većim protocima vode i manjim padom nego što Peltonova turbina može podnijeti.

## 2.4 Reakcijske turbine

Reakcijska turbina stvara energiju iz kombiniranih sila tlaka i pokretne vode. Rotor je postavljen izravno u vodeni tok, dopuštajući da voda teče preko lopatica umjesto da udara svaku pojedinačno. Reakcijske turbine općenito se koriste za mjesta s nižim padom i većim protokom. Dva najčešća tipa reakcijskih turbina su propeler i Francisova. Kinetičke turbine također su vrsta reakcijske turbine.

### 2.4.1 Francisova turbina

Francisova turbina je vrsta pretlačne radijalne vodne turbine. Veličina aktivne zakretne sile na radno kolo ovisi o promjeni količine gibanja vode, tlačnoj razlici, Coriolisovu ubrzanju,

centrifugalnom ubrzanju i dr. Utjecaj svakog od tih činitelja na zakretnu silu mijenja se sa specifičnom brzinom vrtnje, odnosno određuje stupanj reakcije turbine.



*Slika 2-4 Unutrašnjost Francisove turbine*

Voda se dovodi tlačnim cjevovodom i jednolično se raspoređuje po obodu radnoga kola s pomoću spiralnoga kanala [9].

Zakretanjem statorskih lopatica mijenja se protok kroz turbinu (regulacija snage).

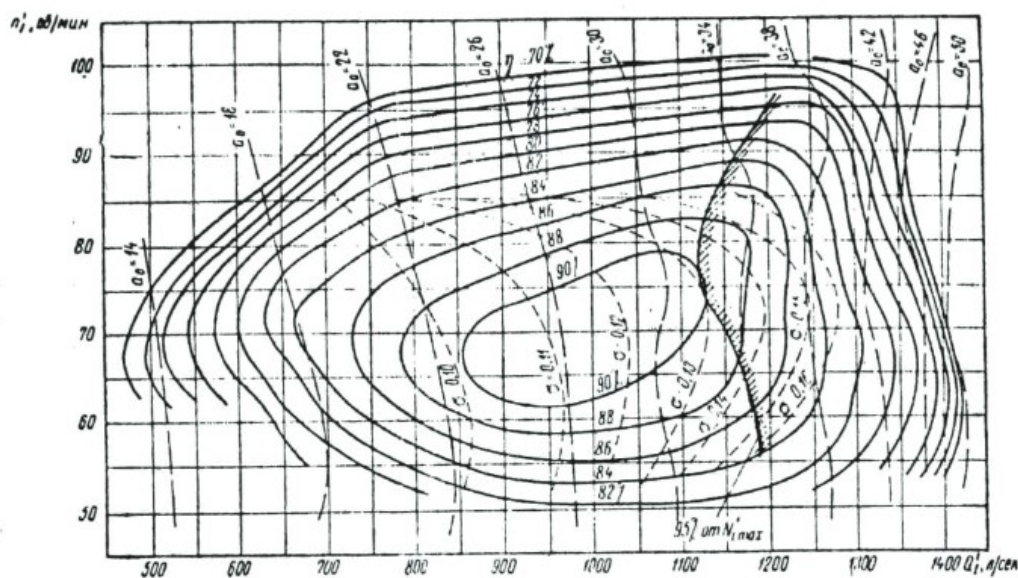
Posljedica zakretanja statorskih lopatica promjena je kuta nastrojavanja na lopatice radnoga kola, što uzrokuje znatne hidrodinamičke gubitke.

Zbog toga Francisova turbina mora raditi približno u svojem proračunskom režimu rada, pa se smatra da ta turbina ima loša regulacijska svojstva. U radno kolo, koje se sastoji od niza nepokretnih (fiksni) lopatica, voda uzlazi radijalno, a izlazi aksijalno i kroz difuzor se odvodi u odvodni kanal turbine (donja razina vode). Uporabom difuzora smanjuju se izlazni gubici turbine, koji su povezani s kinetičkom energijom vode. U neproračunskom (neoptimalnom) režimu rada česte su pulsacije tlaka iza radnoga kola, koje se mogu ublažiti dovodom zraka na ulazu u difuzor.

## **2.5 Efficiency hill vodene turbine (školjkasti dijagram)**

Jedan od glavnih parametara koji se koristi za opis performansi turbine je njezina učinkovitost. Učinkovitost turbine ovisi o neto padu i protoku kroz nju. Grafičko sredstvo za prikaz ove ovisnosti je takozvani hill chart ili školjkasti dijagram. On sadrži krivulje konstantne učinkovitosti turbine. Primjer hill dijagrama modela Francisove turbine dan je na sljedećoj slici.

Dijagram modela turbine dan je u bezdimenzionalnim koordinatama. Na temelju poznatih dimenzija i brzine vrtnje turbinskog rotora može se formirati još jedan dijagram s protokom na apscisi i neto padom na ordinati. Vrijednosti prikazane na dijagramu za model turbine dobivene su mjerenjem. Vrijednosti učinkovitosti modelne i izgrađene turbine su različite, zbog razlika u njihovim dimenzijama. Ova korekcija se mora uzeti u obzir u procesu određivanja učinkovitosti turbine. Tijekom rada turbinske jedinice u određenom postrojenju potrebno je pridržavati se niza uvjeta i ograničenja, kao što su: Raspon neto pada jedinice, opseg ispuštanja kroz postrojenje, maksimalno otvaranje prolaznog zatvarača turbine,



Slika 2-5 Školjkasti dijagram

Školjkasti dijagram daje potpunu sliku o energetskim i kavitacijkim osobinama turbina. Takav tip dijagrama prikazuje linije istog stupnja korisnosti koje liče na topografske izohipse.

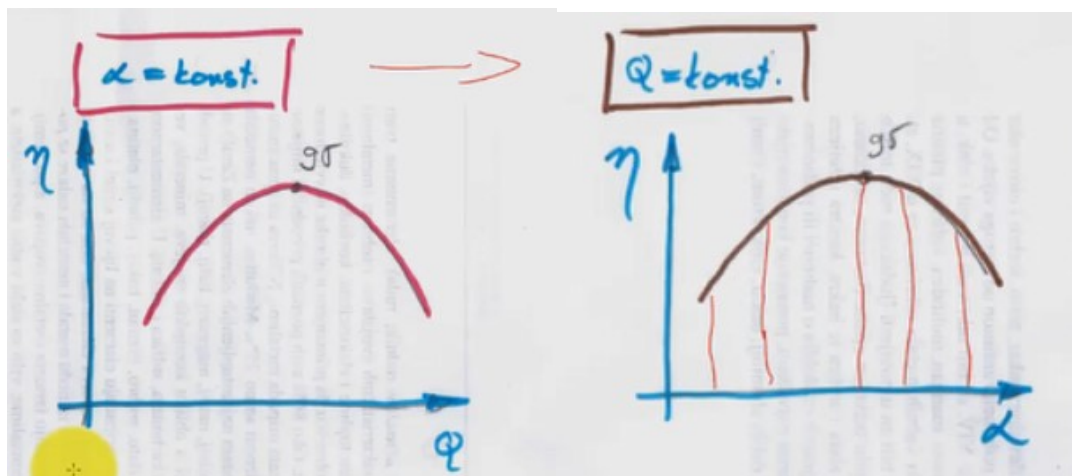
Na apscisi se nalazi promjena protoka  $Q$ , a na ordinati neto pad  $H$ .

Zelenom bojom prikazane su linije iste iskoristivosti. Vidimo kako se iz unutrašnjosti prema van smanjuje iskoristivost. Iscrtkane kose linije predstavljaju linije konstantnog položaja privodećih lopatica.

Kosa crvena linija s oznakom  $\alpha$  prikazuje promjenu korisnosti u funkciji protoka s konstantnom almom. Kretanjem po toj liniji i ispisivanjem korisnosti možemo dobiti graf prikazan na slici. Vidimo kako je optimum (najveća korisnost) pri središtu školjkastog grafa.



Sličan graf dobijemo kada školjkasti dijagram presiječemo s obzirom na konstantni protok  $Q$ .



Slika 2-6 Grafovi korisnosti za konstantni  $\alpha$  i  $Q$

## 2.6 Trokut brzina i protok vode u turbini

Fizika protoka vode na lopatici Francisove turbine uključuje nekoliko ključnih aspekata [4]:

Kut pod kojim voda udara u lopaticu turbine poznat je kao napadni kut. Ovaj kut je bitan za učinkovit prijenos energije. Ako je kut preplitak, voda može skliznuti s oštrice bez prijenosa puno energije. Ako je kut prestrm, voda može uzrokovati prekomjerno otpor, što dovodi do smanjene učinkovitosti. Optimalan dizajn oblika oštrice i napadnog kuta ključni su za maksimiziranje izlazne snage.

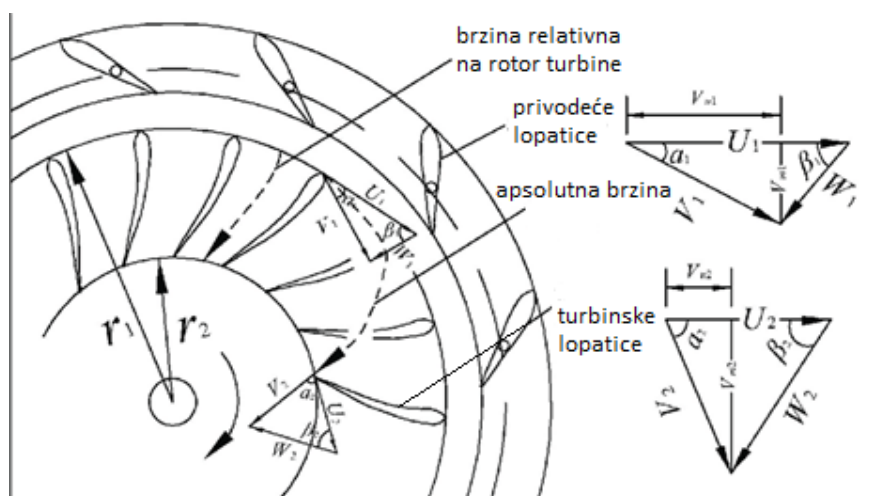
Kako voda teče preko lopatice turbine, njezina se brzina i tlak mijenjaju. U blizini vodećeg ruba lopatice, brzina vode je relativno velika, a tlak je relativno nizak. Kako se voda kreće po površini lopatice, njezina se brzina smanjuje, a tlak raste. Ova promjena u raspodjeli tlaka i brzine bitna je za stvaranje uzgona i momenta na lopatici turbine [10].

Bernoullijev princip kaže da kako se brzina fluida (u ovom slučaju vode) povećava, njegov tlak opada. Ovaj princip igra ulogu u stvaranju uzgona na lopaticama turbine. Oblik lopatice je dizajniran da iskoristi prednosti ovog principa, uzrokujući ubrzanje vode na jednoj strani lopatice, što rezultira razlikom tlaka koja stvara silu podizanja, uzrokujući rotaciju lopatice.

Granični sloj je tanak sloj tekućine koja se sporije kreće i koja se stvara blizu površine oštrice zbog viskoznih učinaka. U određenim uvjetima, kao što su visoki napadni kutovi, granični sloj se može odvojiti od površine oštrice, uzrokujući gubitak učinkovitosti. Inženjeri pažljivo dizajniraju oblik i kut lopatica kako bi minimalizirali odvajanje graničnog sloja i poboljšali performanse turbine.

U određenim uvjetima rada, tlak na lopatici turbine može pasti do točke u kojoj voda isparava, stvarajući šupljine ili mjehuriće. Kada se te šupljine skupe dok voda teče preko oštrice, to može uzrokovati eroziju i oštećenje površine oštrice. Ispravan dizajn i rad turbine imaju za cilj izbjegavanje kavitacije kako bi se održala učinkovitost i dugovječnost turbine.

Fizika protoka vode na lopatici Francisove turbine složena je međuigra dinamike fluida, raspodjele tlaka i dizajna komponenti turbine. Inženjeri i znanstvenici neprestano nastoje optimizirati dizajn turbina kako bi postigli veću učinkovitost i održivu proizvodnju energije iz hidroenergetskih izvora.



Slika 2-7 Trokut brzina na lopaticama Francisove turbine

Na slici 2-7 prikazan je trokut brzina u turbini. Apsolutna brzina označena je s  $V$ . Kako lopatica rotira, imamo i obodnu brzinu označenu s  $U$ .

S  $W$  označena je relativna brzina. Apsolutnu brzinu možemo podijeliti na tangencijalnu brzinu  $V_t$  u smjeru obodne brzine i radijalnu brzinu  $V_r$ . Radijalnu brzinu možemo izračunati iz protoka i površine presjeka.

## 2.7 Protok kroz Francisovu turbinu

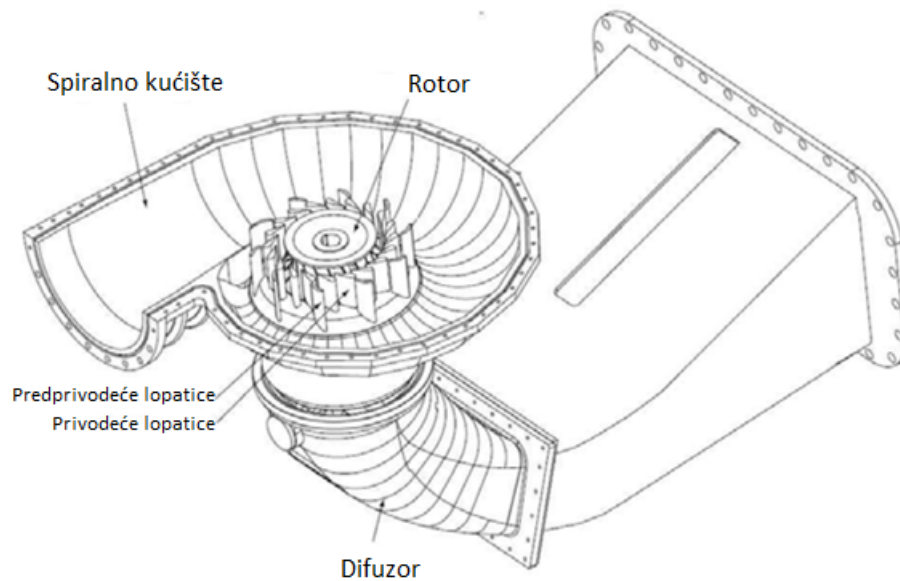
Turbina se sastoji od vanjskog spiralnog kućišta, praćenog skupom fiksnih lopatica koje se nazivaju predprivodeće lopatice. Slijedi skup pokretnih lopatica koje se nazivaju privodeće lopatice, zatim skupina središnje postavljenih lopatica koje se nazivaju rotor i na kraju, izlazni kanal koji se naziva propusna cijev kanala.

Protok ulazi u Francisovu turbinu kroz spiralno kućište. Smanjenje površine poprečnog presjeka kućišta osigurava da protok ulazi u središnji dio turbine ravnomjernom brzinom po cijelom obodu [5].

Protok zatim prolazi kroz dva seta lopatica prije nego što uđe u rotor, naime – vanjske lopatice i unutarnje vodeće lopatice. Zaporne lopatice su fiksne i pomažu u usmjeravanju vode prema vodećem dijelu. Oni također pomažu u smanjenju vrtloga na ulaznom toku [6].

Privodeće lopatice koje se nalaze između lopatica za predprivodećih lopatica i rotora imaju kritičniju ulogu. Oni upravljaju protokom na temelju zahtjeva za snagom. Potražnja za električnom energijom varira tijekom vremena. Privodeće lopatice upravljaju protokom vode i osiguravaju da je proizvodnja energije usklađena s potražnjom. Osim toga, privodeće lopatice kontroliraju kut protoka usmjeren prema lopaticama rotora. Oni pokušavaju osigurati da kut ulaznog toka bude pod optimalnim napadnim kutom kako bi iskoristili maksimalnu snagu vode.

### 3. GEOMETRIJA



*Slika 3-1 Dijelovi turbine*

Za kreiranje modela turbine potrebno ju je modelirati u nekom od CAD programa. Za crtanje geometrije koristio se softver Catia.

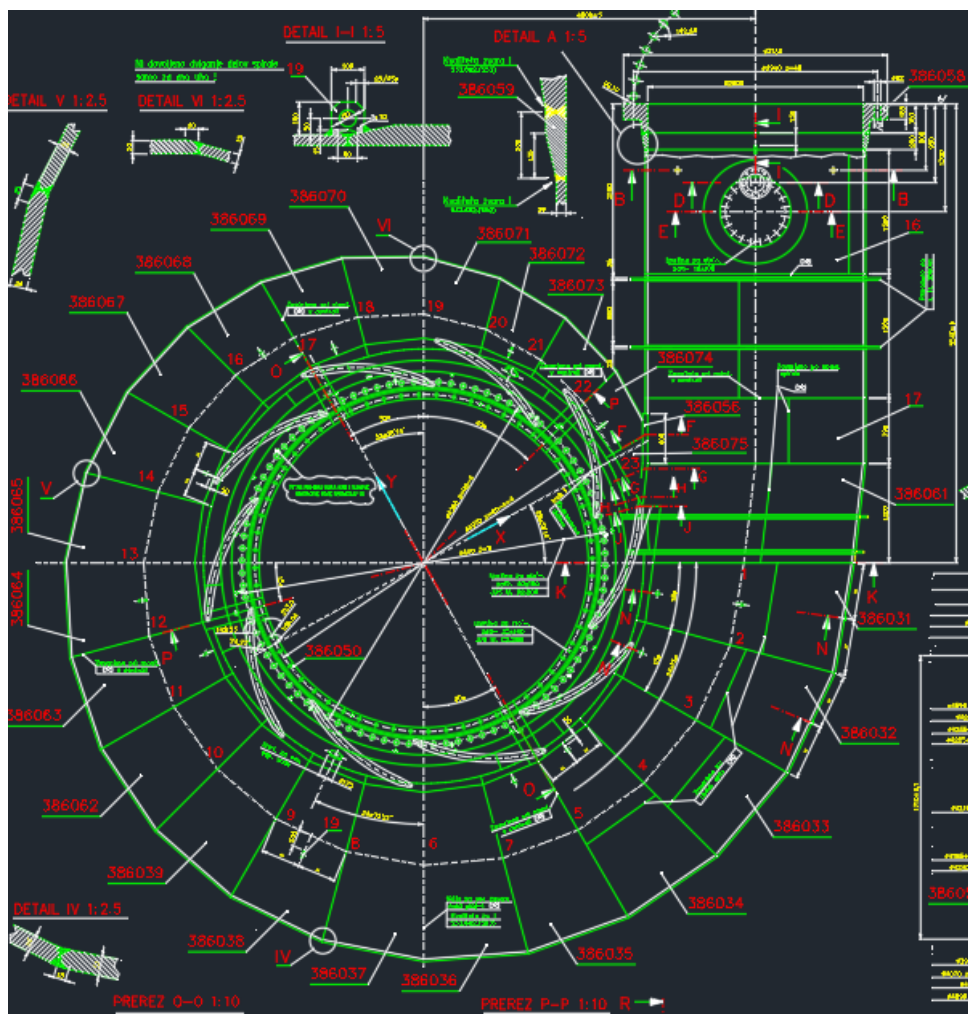
Catia je softverski paket koji se koristi za dizajn, modeliranje i analizu proizvoda u 3D okruženju. Razvila ga je francuska kompanija Dassault Systèmes. CATIA se koristi u različitim industrijama kao što su automobilska, zrakoplovna, brodogradnja, industrija obrade metala i druge.

Ovaj softver omogućava inženjerima i dizajnerima da stvaraju složene modele proizvoda, od konceptualne faze do finalnog proizvoda. Catia pruža alate za 3D modeliranje, analizu, simulaciju i izrad tehničkih crteža.

Proces stvaranja geometrije modela turbine sastoji se od crtanja spirale te privodećih i predprivodećih lopatica. Dimenzije i sam položaj te izgled spirale i lopatica dani su iz 2D nacrtu turbine nacrtanih u softveru AutoCAD (Slike 3-2, 3-3, 3-4, 3-5). Postupak izrade modela turbine će biti da se najprije konstruira geometrija spirale, a potom i geometrije lopatica na način da se oduzmu od volumena spirale. Kada se koristi spomenuti proces kreiranja modela turbine zapravo

se modelira volumen vode u turbini, a ne sama geometrija turbine. Na taj način, kada konstruiramo lopatice – uklanjamo taj dio volumena od volumena spirale.

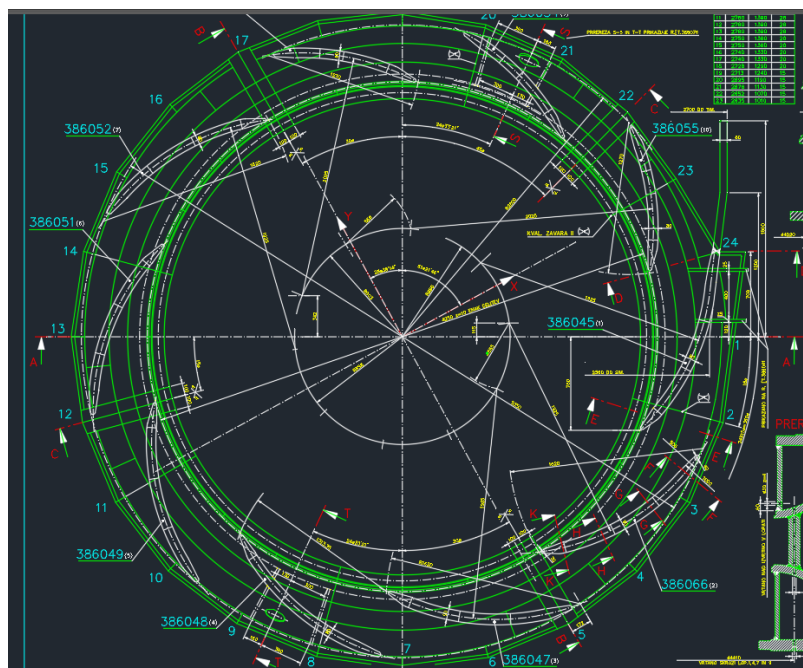
Nedostatak tih manjih volumena unutar spirale predstavljat će dio domene gdje se voda ne može nalaziti, odnosno privodeće i predprivodeće lopatice.



Slika 3-2 Nacrt spirale

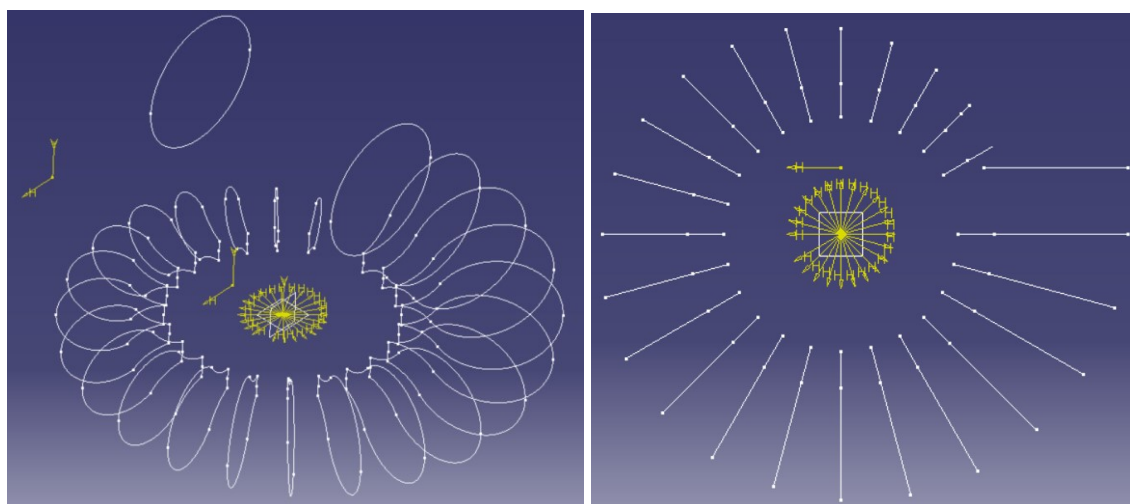


### 3.1 Crtanje spirale i predprivodećih lopatica



*Slika 3-5 Geometrija predprivodećih lopatica*

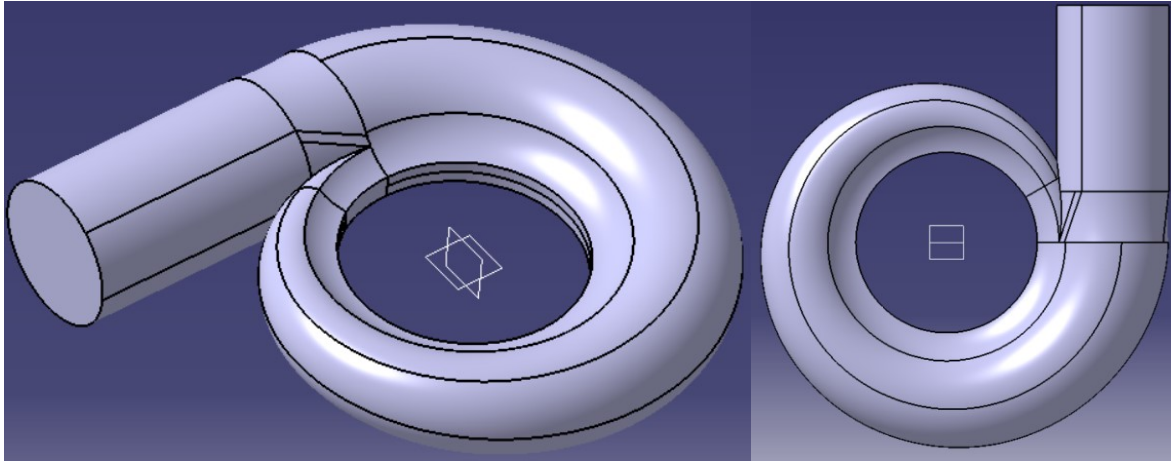
Spirala je konstruirana kreiranjem površina koje su razmaknute  $15^\circ$  oko centralne osi (Slika 3-6). Koristeći dimenzije sa nacрта na svakoj od tih ravnina kreiran je jedan presjek spirale čija se površina smanjuje u smjeru kazaljke na satu kako se približavamo dijelu gdje spirala ulazi u vlastiti volumen.



*Slika 3-6 Presjeci spirale*

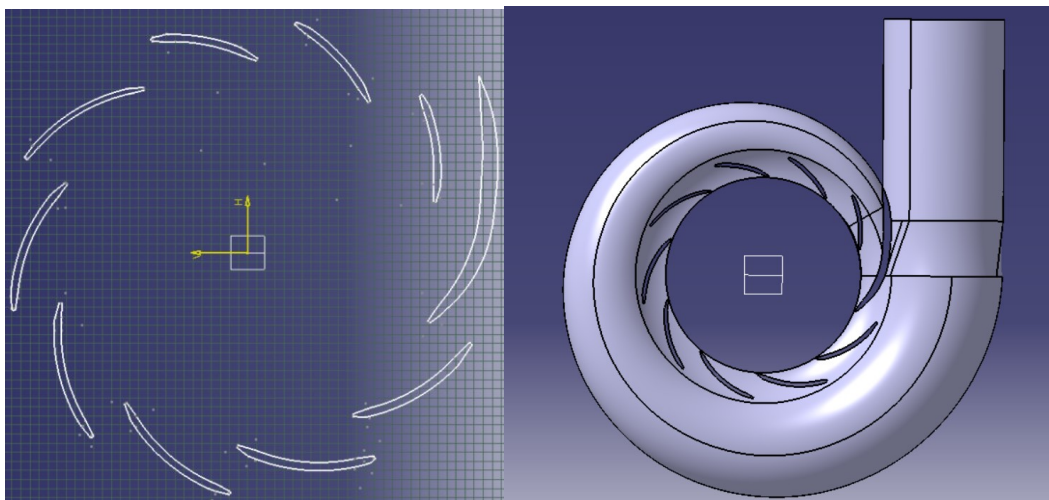


Nakon crtanja spomenutih površina, koristeći opciju Catia softvera zvanu Multi-sections Solid, spajamo ih u jednu cjelinu (Slika 3-7).



*Slika 3-7 Oblik spirale dobiven opcijom Multi Section Solid*

Kao što je rečeno, dobiveni volumen predstavlja volumen vode te za potpuni model moramo dodati odnosno oduzeti volumene lopatica. Na idućoj slici prikazana je geometrija predprivodećih lopatica te ista oduzeta od geometrije spirale čime smo dobili prvi dio geometrije za analizu. Ukupno je 10 predprivodećih lopatica a najveća od njih predstavlja geometrijsko rješenje kako bi se dio gdje spirala ulazi u vlastiti volume odvojio od početka spirale

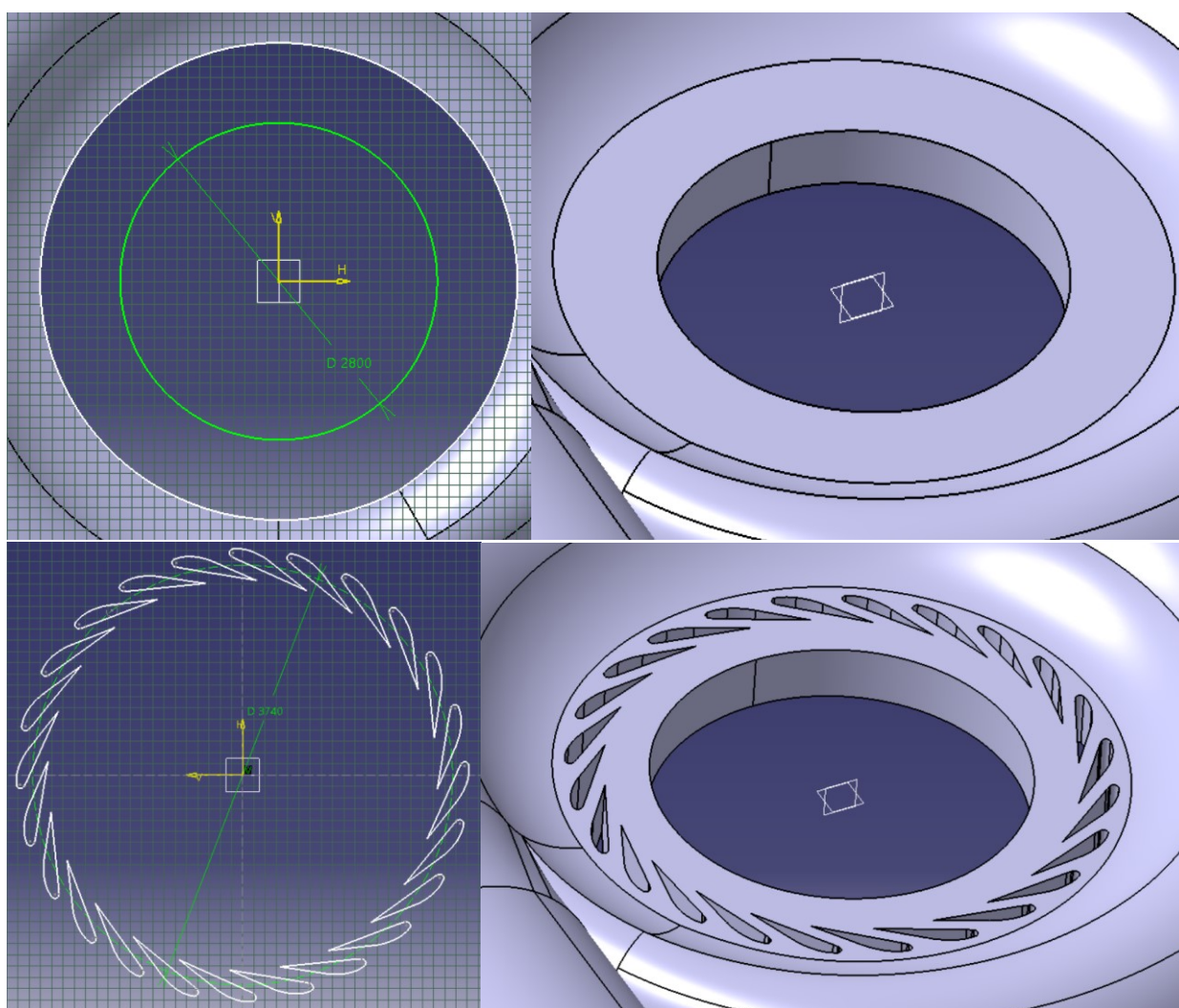


*Slika 3-8 Geometrija spirale s predprivodećim lopaticama*



### 3.2 Crtanje predprivodećih lopatica

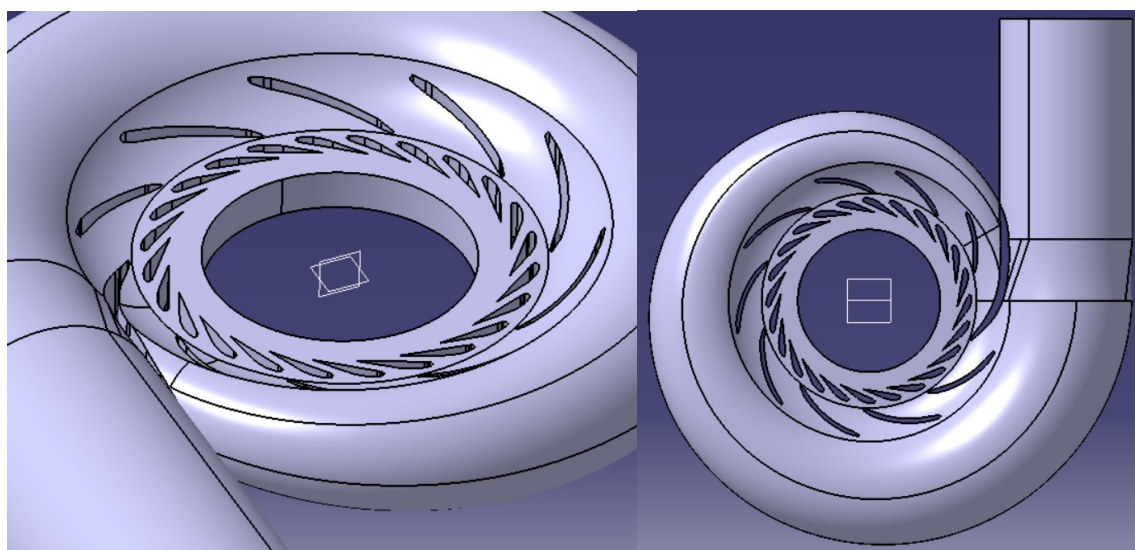
Za predprivodeće lopatice također slijedimo dimenzije i položaje temeljene na AutoCAD nacrtu. Kako bismo nacrtali privodeće lopatice potrebno je dodati kružni dio na unutrašnjoj strani spirale gdje će one biti smještene. Pri konstrukciji dijela uzeto je u obzir da prostor nakon lopatica treba biti dovoljno velik da se rezultati numeričke simulacije mogu jasno vidjeti (Slika 3-9).



*Slika 3-9 Konstrukcija privodećih lopatica*

Privodeće lopatice su potom ponovljene rotirajući oko središta spirale te oduzete od volumena spirale. Ukupno ih ima 20, sve su identične te su od položaja gdje bi dotok vode lopicama bio zatvoren, na ovom primjeru, odmaknute za  $14^\circ$ .

Na slici 3-10 prikazana je konačna geometrija spirale s lopicama odnosno volume vode unutar turbine koji će biti domena za numeričke simulacije.



*Slika 3-10 Spirala s pripadajućim lopicama*

## **4. DOMENA I NUMERIČKA MREŽA**

### **4.1 Ansys ICEM**

Za potrebe stvaranja numeričke mreže za slučajevne analize koristit će se Ansys ICEM.

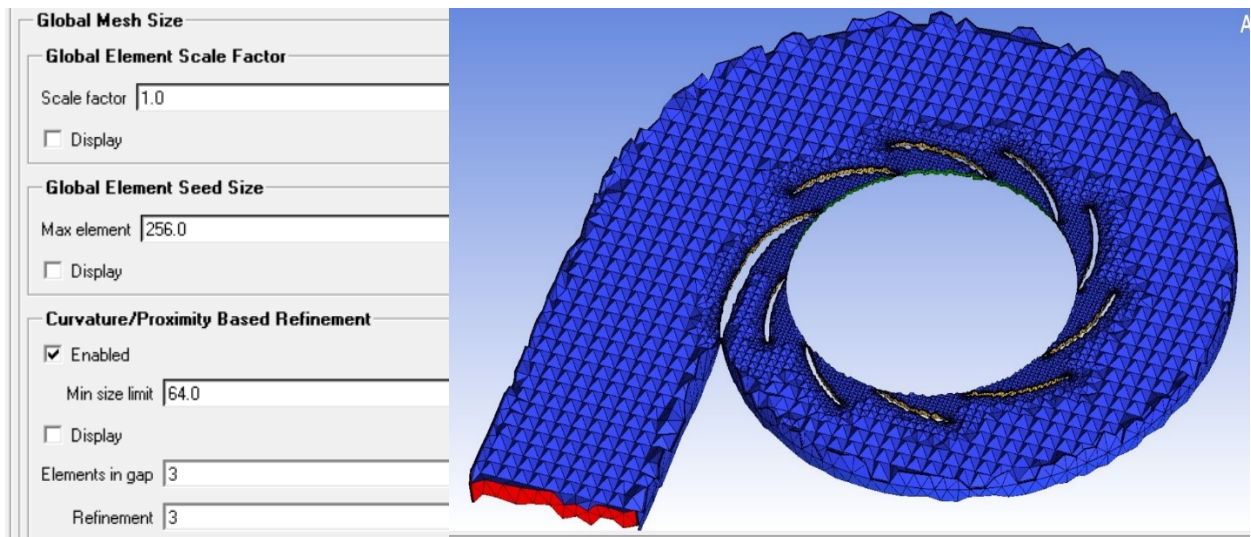
Ansys ICEM je softverski alat za preprocesiranje i stvaranje numeričke mreže koji se koristi u analizi konačnih elemenata (FEA) i računalnoj dinamici fluida (CFD) kako bi se pripremili modeli za simulaciju. ICEM stoji za "Integrated Computer Engineering and Manufacturing," a razvila ga je tvrtka Ansys kao dio svog softverskog paketa za inženjerske simulacije.

### **4.2 Kreiranje numeričke mreže**

Proces omrežavanja biti će takav da se prvo omreži geometrija koju čini spirala s predprivodećim lopaticama te onda dio na kojem su privodeće lopatice, te se onda te dvije geometrije spoje.

#### **4.2.1 Numerička mreža spirale i predprivodećih lopatica**

Za potrebe kreiranja numeričke mreže spirale koristimo nestrukturiranu mrežu napravljenu od tetraedalnih elemenata. Veličina ćelije na lobalnoj je razini postavljena na 256 mm. Pomoću opcije Curvature/Proximity based refinement omogućujemo pogušćenje mreže na tanjim djelovima geometrije gdje je želimo imati samo jedan ili premalo slojeva ćelija. Vrijednost te opcije postavljamo na 64. Uz spomenuti zazlog istu opciju koristimo i za povećanje broja elemenata uz zakrivljene dijelove, u našem slučaju oko krjeva predprivodećih lopatica.



Slika 4-1 Presjek numeričke mreže po sredini spirale

Kreirane su površine koje predstavljaju ulaz vode u domenu – inlet, predprivoće lopatice – PL, spiral te sučelje koji na slikama izgleda kao outlet a koje ćemo koristiti za spajanje numeričke mreže spirale i dijela s privodećim lopaticama. Postavljen je granični sloj od inleta pa do sučelja po cijeloj domeni s visinom od 4 mm te omjerom visine 1.5, a ukupan broj slojeva je 4. Povećali smo broj elemenata na sučelju njihovim smanjenjem te smo dobili brojku od 1 270 000 ćelija u cijeloj numeričkoj mreži.

Part Mesh Setup

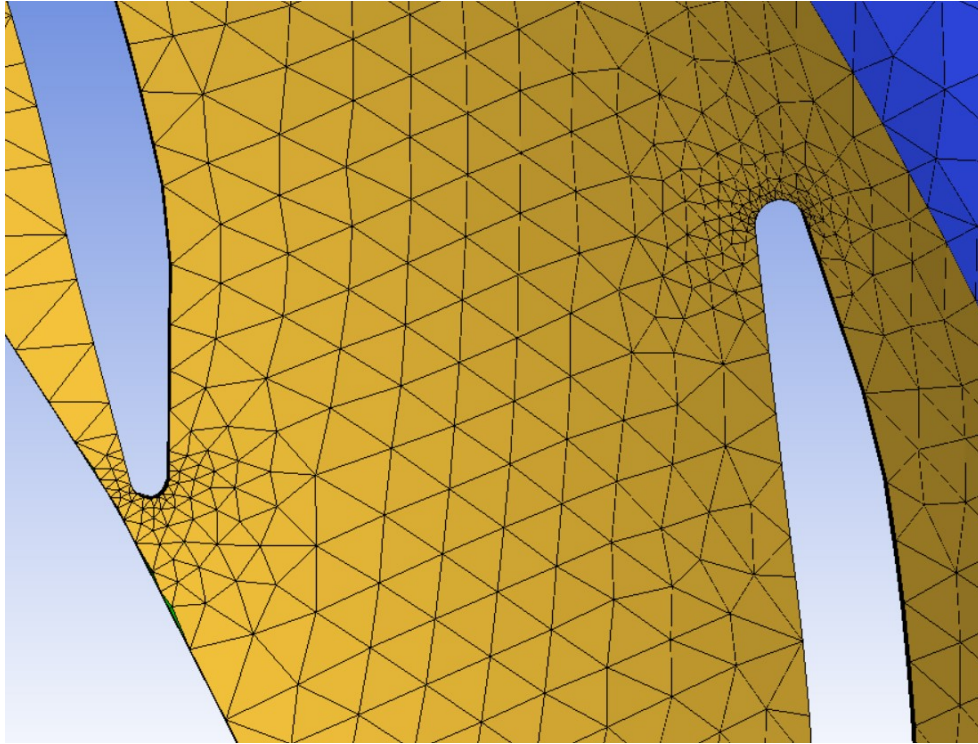
Part	Prism	Hexa-core	Maximum size	Height	Height ratio	Num layers	Tetra size ratio	Te
CREATED_MATERIAL_7	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>						
GEOMETRIJA	<input type="checkbox"/>							
ILET	<input type="checkbox"/>		0	0	0	0	0	
PL	<input checked="" type="checkbox"/>			4	1.5	4	0	
PIRALA	<input checked="" type="checkbox"/>		256	4	1.5	4	0	
POJ	<input type="checkbox"/>		64	0	0	0	0	

Show size params using scale factor  
 Apply inflation parameters to curves  
 Remove inflation parameters from curves

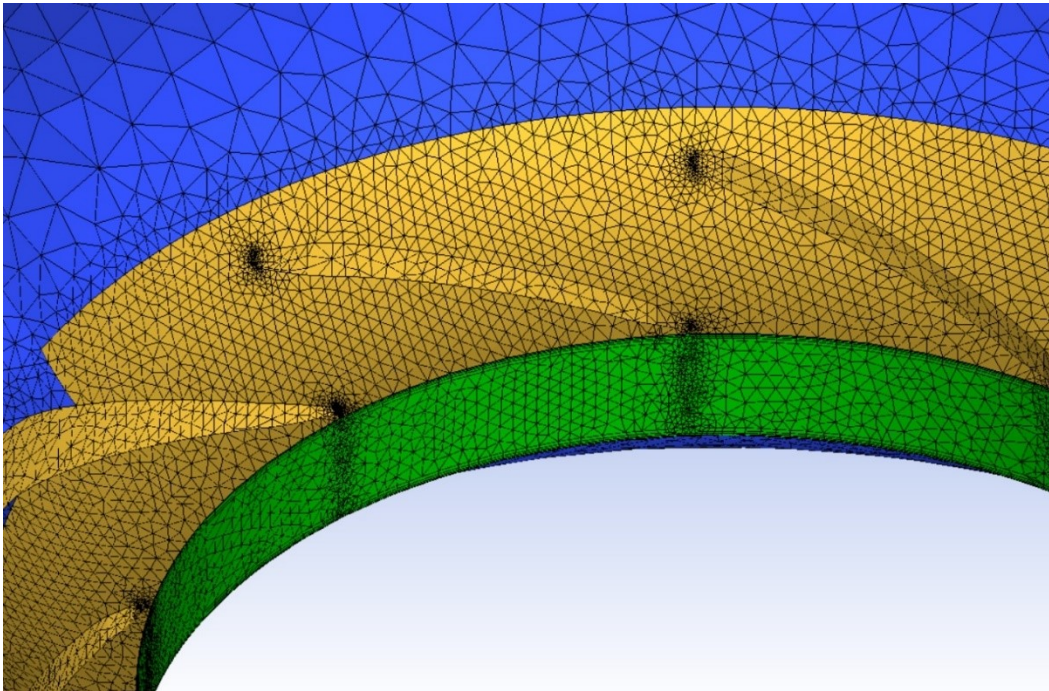
highlighted parts have at least one blank field because not all entities in that part have identical parameters

Slika 4-2 Kreiranje graničnog sloja

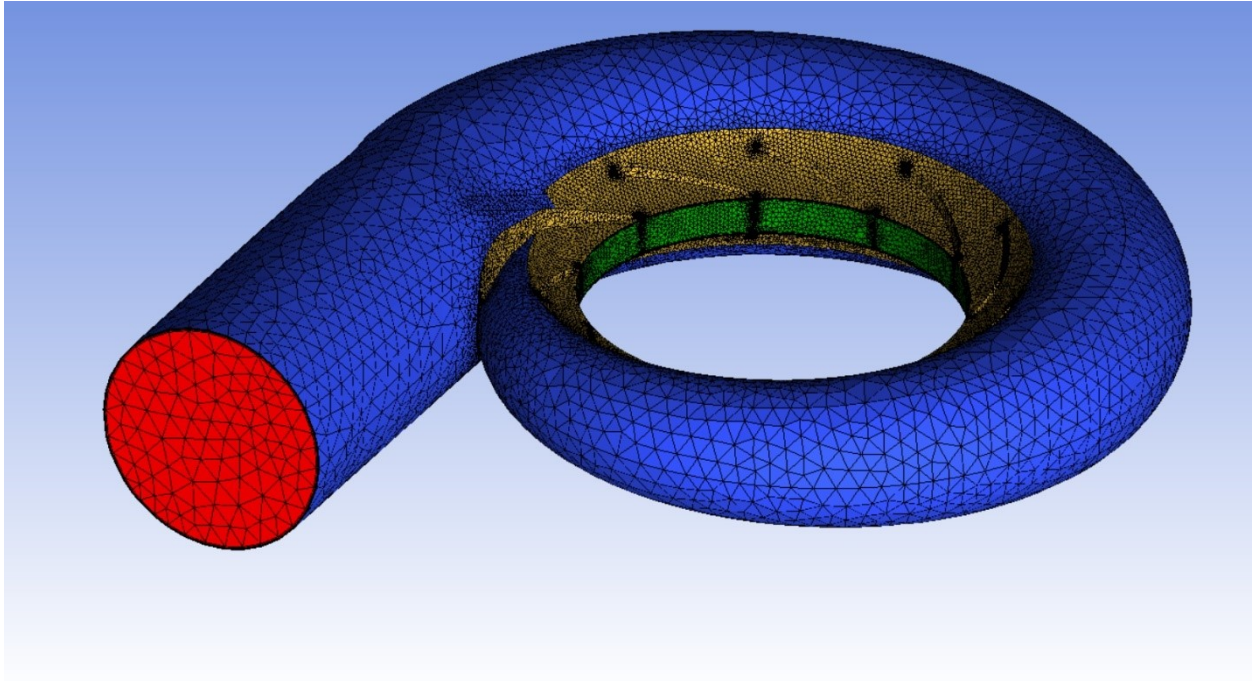




*Slika 4-3 Izgled numeričke mreže pri predprivodećim lopaticama*



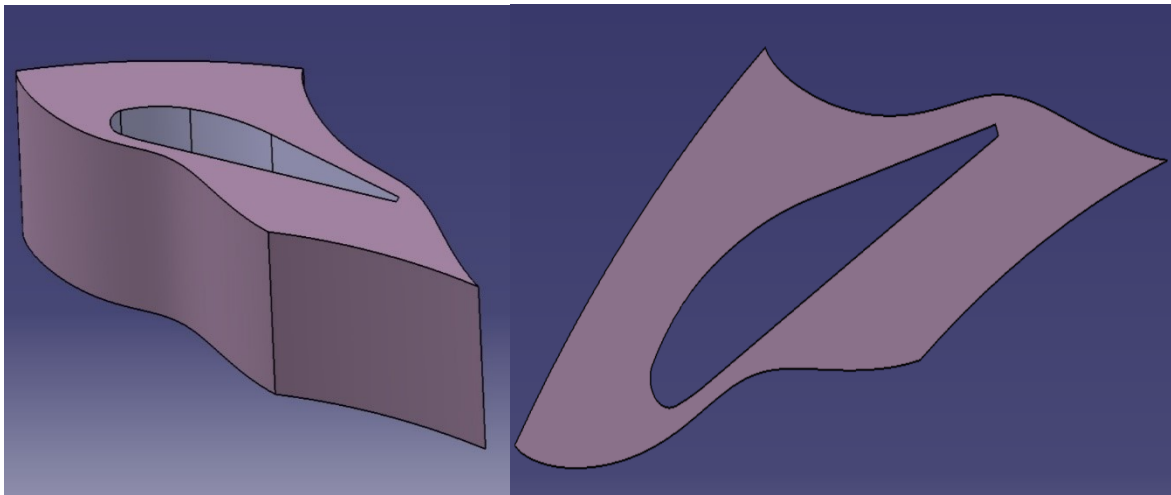
*Slika 4-4 Numerička mreža spirale - detalj*



*Slika 4-5 Potpuni prikaz numeričke mreže spirale*

#### 4.2.2 Numerička mreža privodećih lopatica

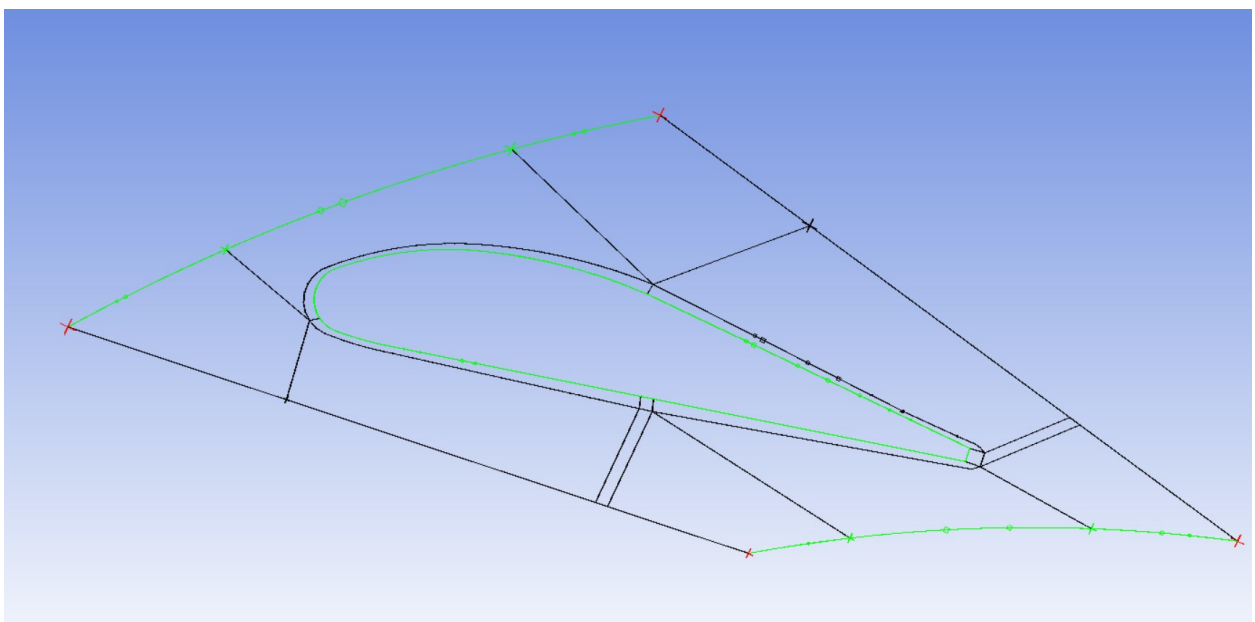
Za potrebe kreiranja numeričke mreže na privodećim lopaticama koristiti ćemo strukturiranu mrežu. To ćemo najlakše napraviti izdvajanjem pojedinog dijela domene koluta s privodećim lopaticama, omrežavanjem istog te njegovim kopiranjem da dobijemo puni krug elemenata i naposljetku, spajanjem s geometrijom spirale.



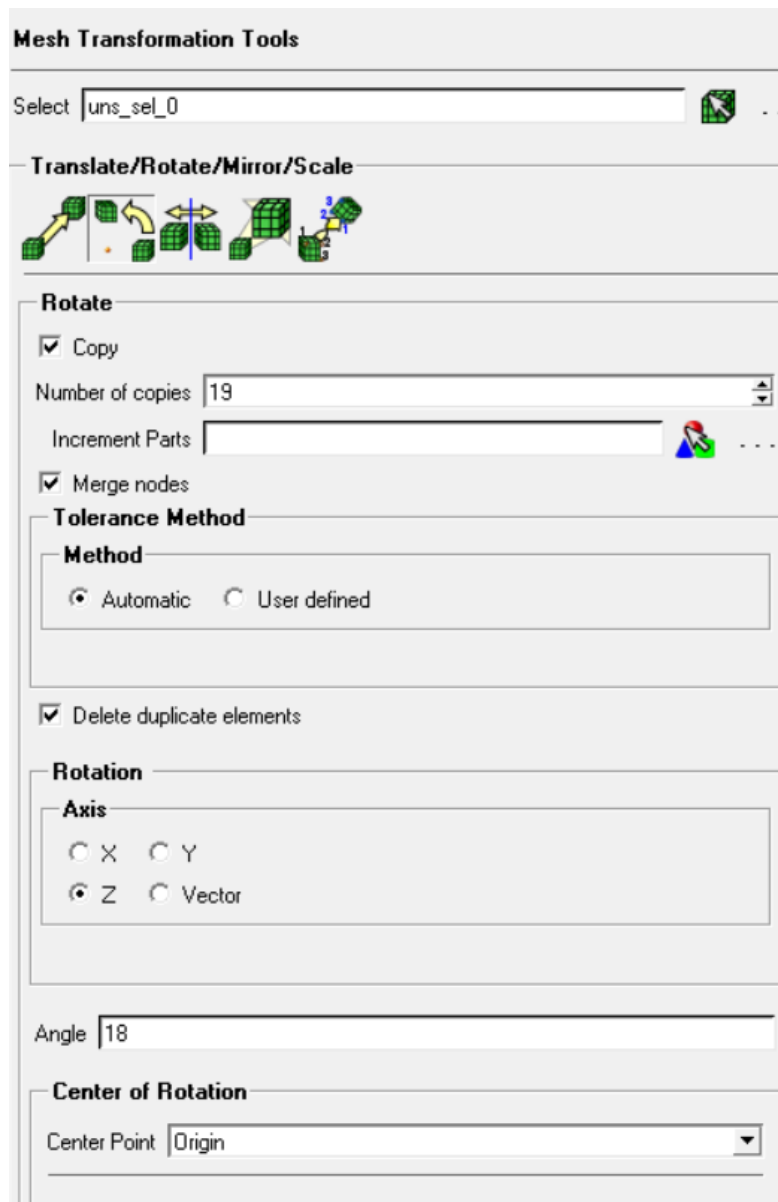
*Slika 4-6 Geometrija na kojoj će biti napravljena numerička mreža*

Prvo radimo blokovsku podjelu domene iz koje ćemo ju podijeliti na nekoliko dijelova za koje pojedinačno možemo upisivati brojeve elemenata u ovisnosti gdje je potrebno pogustiti mrežu. Nakon podjele domene, stvaramo O-grid odnosno dio oko same lopatice koji će nam biti potreban za kreiranje graničnog sloja.

Podjelu blokova i O-grid vidimo na idućoj slici na kojoj je, za lakšu vizualizaciju, uključen samo prikaz rubova blokova. Za svaki od tih rubova blokova definiramo broj elemenata.



*Slika 4-7 Blokovska podjela domene lopatice*

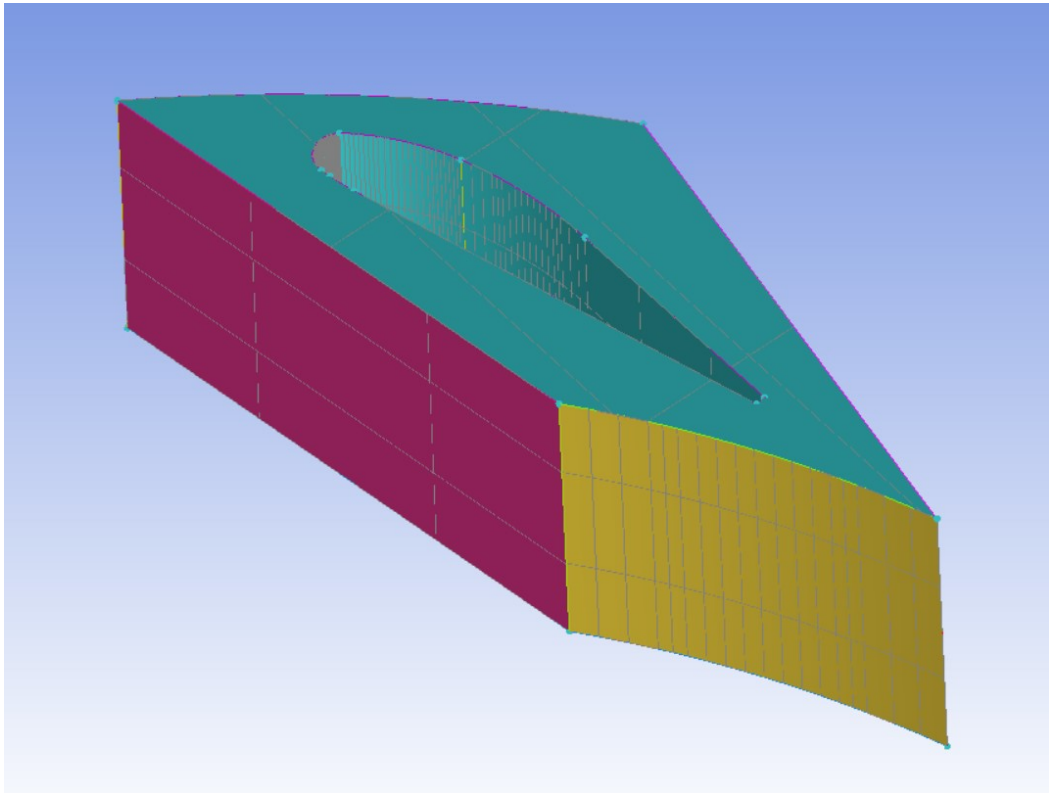


*Slika 4-8 Postavke pri rotiranju mesha lopatica*

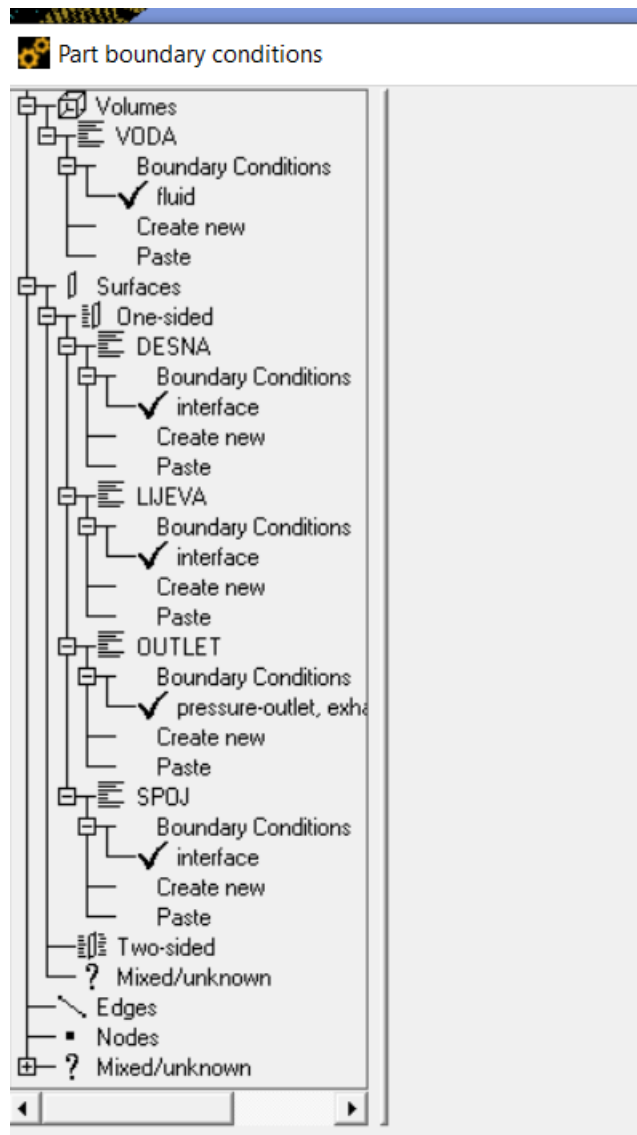
Nakon što je napravljena numerička mreža oko jedne lopatice kreirane su karakteristične površine putem opcije Create Part. Te površine predstavljaju rubne uvjete (boundary conditions) koje ćemo koristiti pri daljnjoj manipulaciji mesha i, naposljetku, numeričkoj analizi. Na slici 4-9 je crvenom bojom označena površina imena DESNA, a sa druge strane površina imena LIJEVA. Za te će površine biti potrebno napraviti sučelje da dobijemo cijelu povezanu domenu.



Žutom bojom je označena površina imena OUTLET koji će biti konačan izlazak fluida iz cijele domene, a nasuprot njega je sučelje koje će se koristiti za spajanje sa sučeljem numeričke mreže spirale. Samu definiciju vrste rubnog uvjeta možemo napraviti i u ovom dijelu , prije ulaza u sami Fluent, a isto je prikazano na slici 4-10.

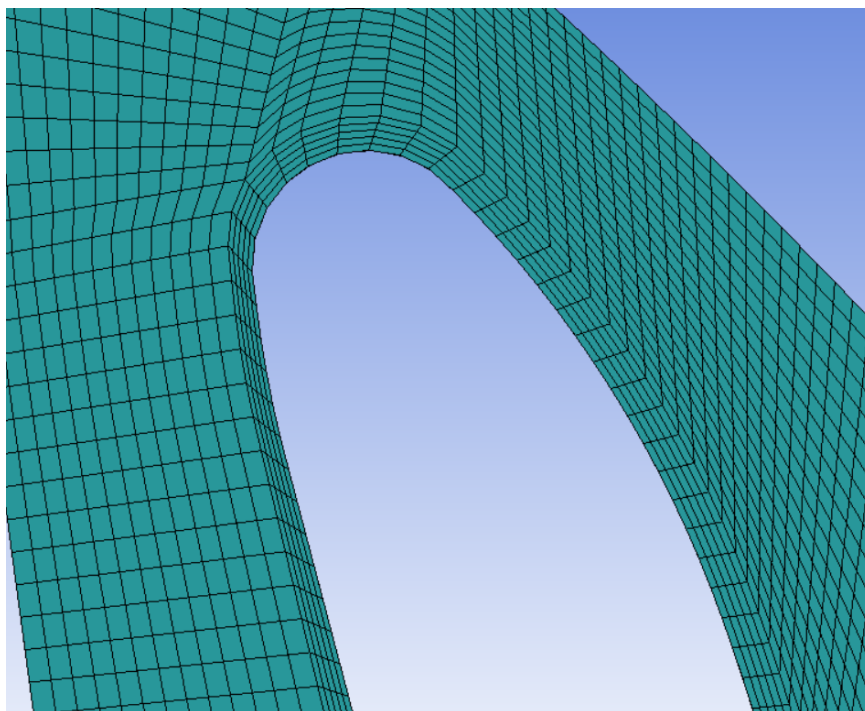


*Slika 4-9 Označene rubne površine*

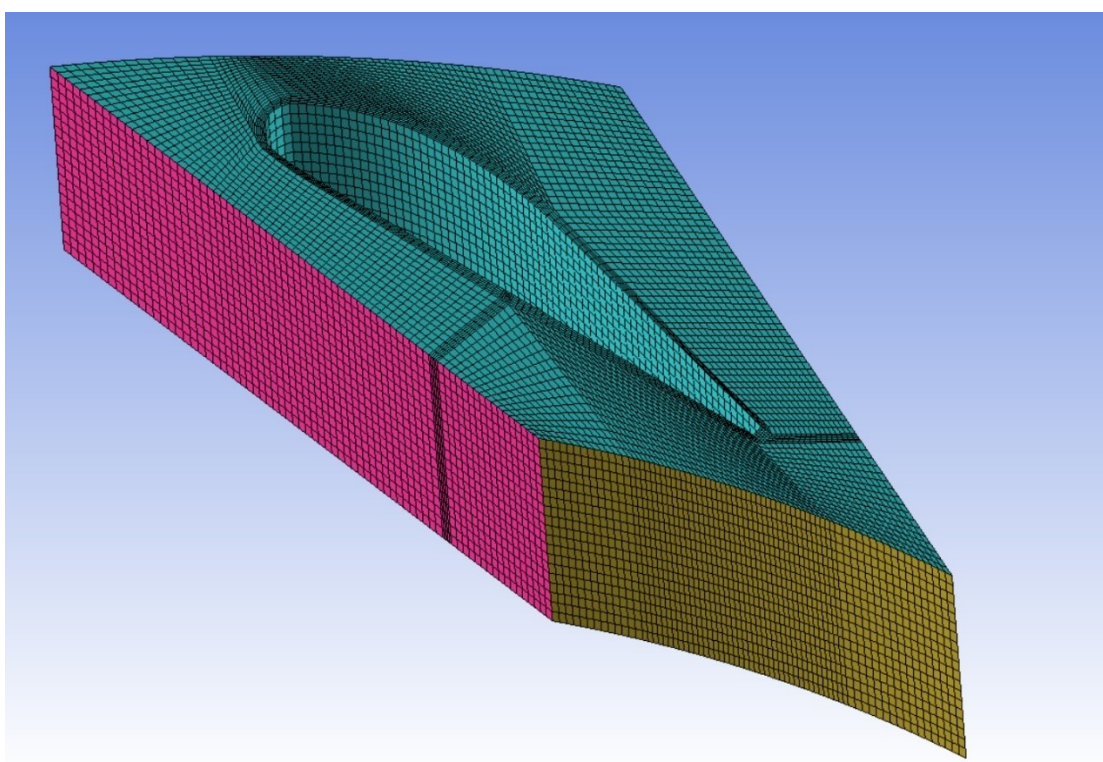


Slika 4-10 Defininiranje rubnih uvjeta unutar Ansys ICEM-a

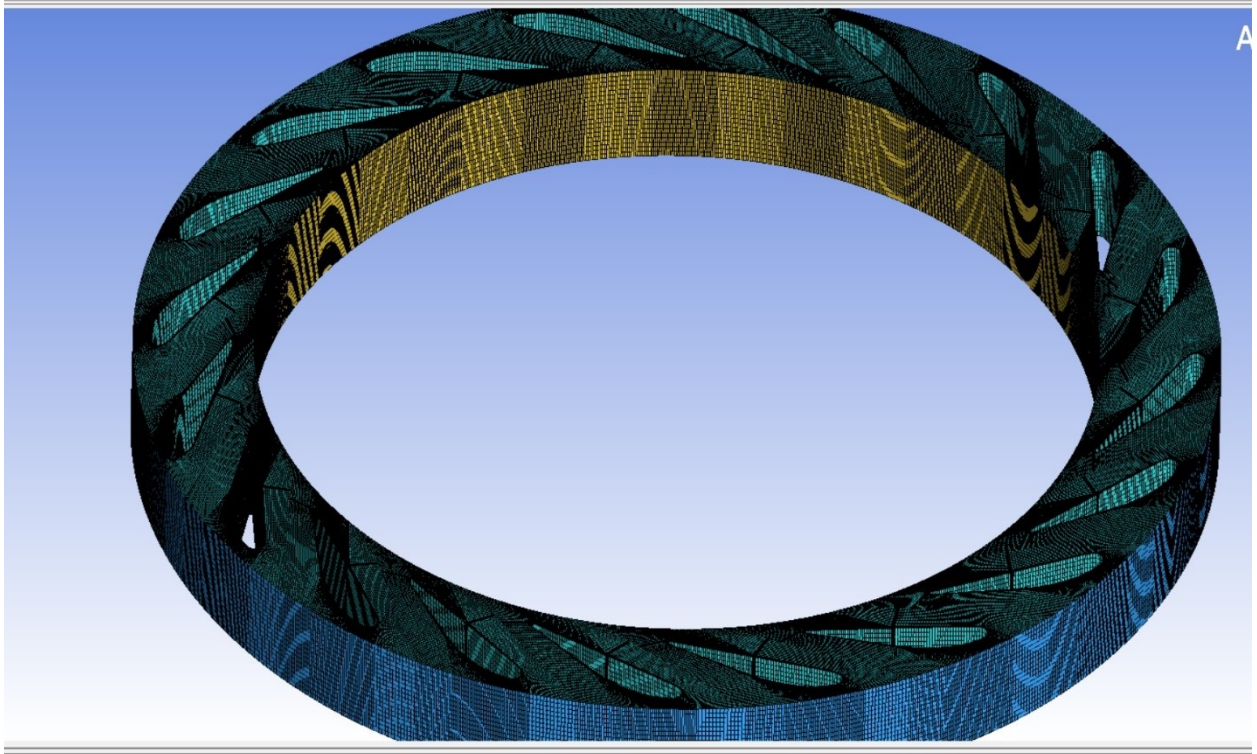
Na slikama 4-11 i 4-12 vidimo kako izgleda numerička mreža oko jedne od lopatica koju je sada potrebno rotirati. Mrežu rotiramo oko Z osi, 19 puta kutem od  $18^\circ$  a cijela rotacija se vrši oko točke koja je središte kruga oko kojega su konstruirane privodeće lopatice. Odabrano je automatsko spajanje kopiranih dijelova s tolerancijom od 0.192 mm, kao i automatsko brisanje dupliciranih elemenata. Ukupan broj elemenata za sve slučajeve varira između 1100000 do 1 800 000 elemenata



*Slika 4-11 Numerička mreža oko jedne od lopatica-detalj*



*Slika 4-12 Potpuni prikaz domene oko jedne lopatice*



*Slika 4-13 Kompletna domena privodećih lopatica*

Samo spajanje dviju domena odraditi će se unutar Fluent softvera. Na identičan način, uz manje razlike razmještaja blokova i broja elemenata po rubu bloka napravljeno je svih 9 numeričkih mreža privodećih lopatica.

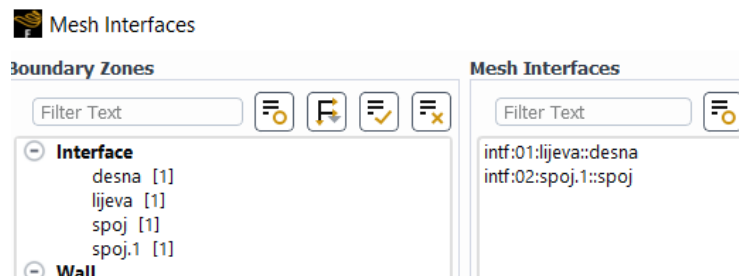
Numerička mreža spirale prilagođena je za svaki slučaj posebno, stoga imamo i 9 numeričkih mreža spirale koje se razlikuju samo u dijelu domene gdje će se mreža spirale spajati s mrežom privodećih lopatica. Temeljna je razlika u definiranju tog rubnog područja spajanja na način da su u doiru elementi sličnih dimenzija.

## 5. NUMERIČKA ANALIZA

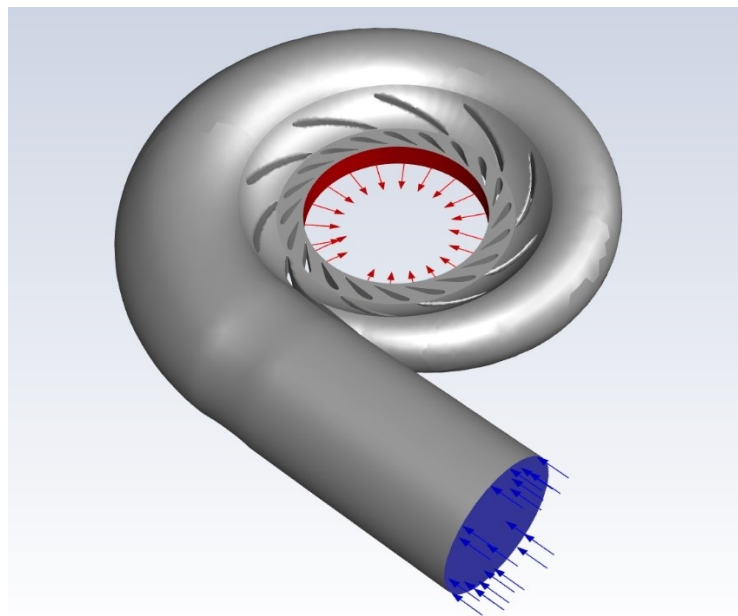
### 5.1 Spajanje domena

Prije samog postavljanja računale analize potrebno je spojiti domene na pravilan način. Najprije pomoću opcije Mesh Interfaces spajamo bočne stranice pojedinačne domene privodećih lopatica prethodno definiranih u ICEM-u, LIJEVA i DESNA.

Nakon toga spajamo domenu spirale i domenu privodećih lopatica putem površina nazvanih SPOJ. Na slici 5-1 vide se kreirana sučelja između tih površina, a na slici 5-2 vidimo konačan izgled domene spremne za numeričku analizu.



Slika 5-1 Stvaranje sučelja mreže



Slika 5-2 Prikaz cjelokupne domene u FLUENT-u

## 5.2 Postavke numeričke analize

Kao model analize odabran je standardni k- epsilon model sa standardnim zidnim funkcijama.

K - epsilon model za turbulenciju najčešći je za simulaciju srednjih karakteristika strujanja za uvjete turbulentnog strujanja. To je model vrtložne viskoznosti koji je klasa modela turbulencije koji se koristi za izračunavanje Reynoldsovih napreznja.

Model ima dvije jednađbe. To znači da osim jednađbi očuvanja, rješava dvije transportne jednađbe (parcijalne diferencijalne jednađbe), koje objašnjavaju učinke poput konvekcije i difuzije turbulentne energije. Dvije prenesene varijable su turbulentna kinetička energija, koja određuje energiju u turbulenciji i brzinu turbulentne disipacije koja određuje brzinu disipacije turbulentne kinetičke energije.

Postoje različite varijacije k-epsilon modela kao što su Standard, Realizable, RNG, itd. svaka s određenim modifikacijama radi boljeg rada pod određenim uvjetima protoka fluida.

Postavljamo djelovanje gravitacije za -Z os, te definiramo fluid u zonama – obična voda.

Za definiranje inleta koristimo boundary uvjet – mass flow inlet što znači da definiramo maseni tok na ulazu u domenu. Svaki od 9 slučajeva imati će svoj protok a u slijedećoj tablici nalaze se protoci za pojedine kuteve.

*Tablica 5-1 Popis kuteva i pripadajućih protoka*

<b>Kut lopatice [°]</b>	4	6	8	10	12	14	16	18	20
<b>Maseni protok [kg/s]</b>	30000	33750	37500	41250	45000	48750	52500	56250	60000

Nakon te analize napraviti ćemo analizu za sve kuteve pri istom masenom protoku od 45 000 kg/s.

Od ostalih rubnih uvjeta imamo pressure outlet na samom izlazu iz domene, sučelja odnosno interface površine između spoja domene spirale i privodećih lopatica, te zidove koji su rubovi geometrije spirale i privodećih lopatica.

Kao metoda rješavanja stacionarne numeričke analize odabran je SIMPLE algoritam. Ako se problem stacionarnog stanja rješava iterativno, nije potrebno u potpunosti riješiti linearnu spregu tlaka i brzine, jer promjene između uzastopnih rješenja više nisu male. SIMPLE algoritam počiva na slijedećem principu.

Rješavanjem jednadžbe količine gibanja dobiva se aproksimacija polja brzine. Izraz gradijenta tlaka izračunava se pomoću distribucije tlaka iz prethodne iteracije ili početne pretpostavke. Jednadžba tlaka se formulira i rješava kako bi se dobila nova raspodjela tlaka. Brzine se korigiraju i izračunava se novi niz konzervativnih tokova. Diskretizirana jednadžba momenta i jednadžba korekcije tlaka rješavaju se implicitno, pri čemu se korekcija brzine rješava eksplicitno. To je razlog zašto se naziva "poluimplicitna metoda".

Kako bi se postigla što bolja konvergencija rješenja, protok na ulazu je za svaki slučaj prvotno postavljen na 1000 kg/s dok je broj iteracija 100. Nakon prve analize protok se povećava za 5000 do 10000 kg/s sve do zadanog protoka za slučaj, svaki put u 100 iteracija. Izrazi za prostornu diskretizaciju – gradijent, tlak, moment i turbolentna kinetička energija postavljene su na prvi red. Izrazi su stavljeni na drugi red onda kada se protok postavio na zadani za svaki slučaj te je napravljeno novih 100 iteracija.

U stvarnosti "iznad" spirale Francisove turbine imamo gornju vodu.

Što više otvaramo privodeće lopatice to je veći protok, ali je na ulazu u spiralu, konstantan tlak.

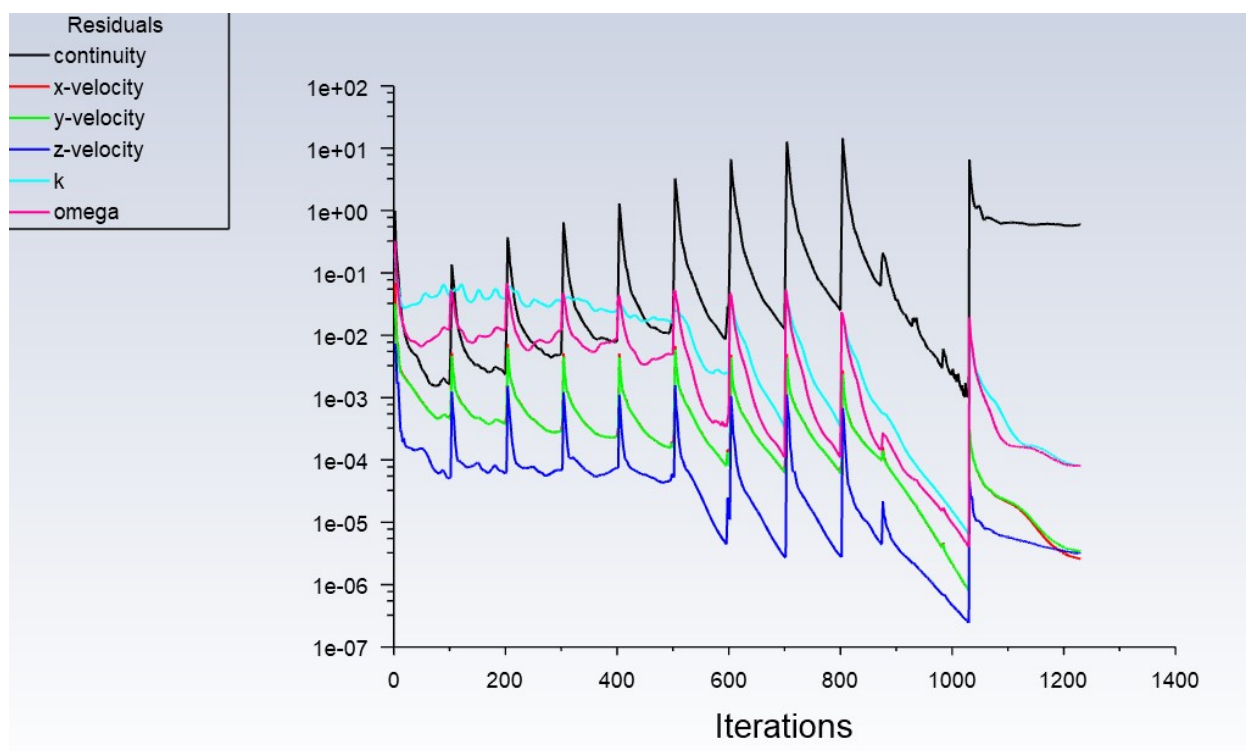
S linearnim mijenjanjem protoka kako raste kut lopatica pokušala se ostvariti takva situacija.



## 6. VIZUALIZACIJA REZULTATA

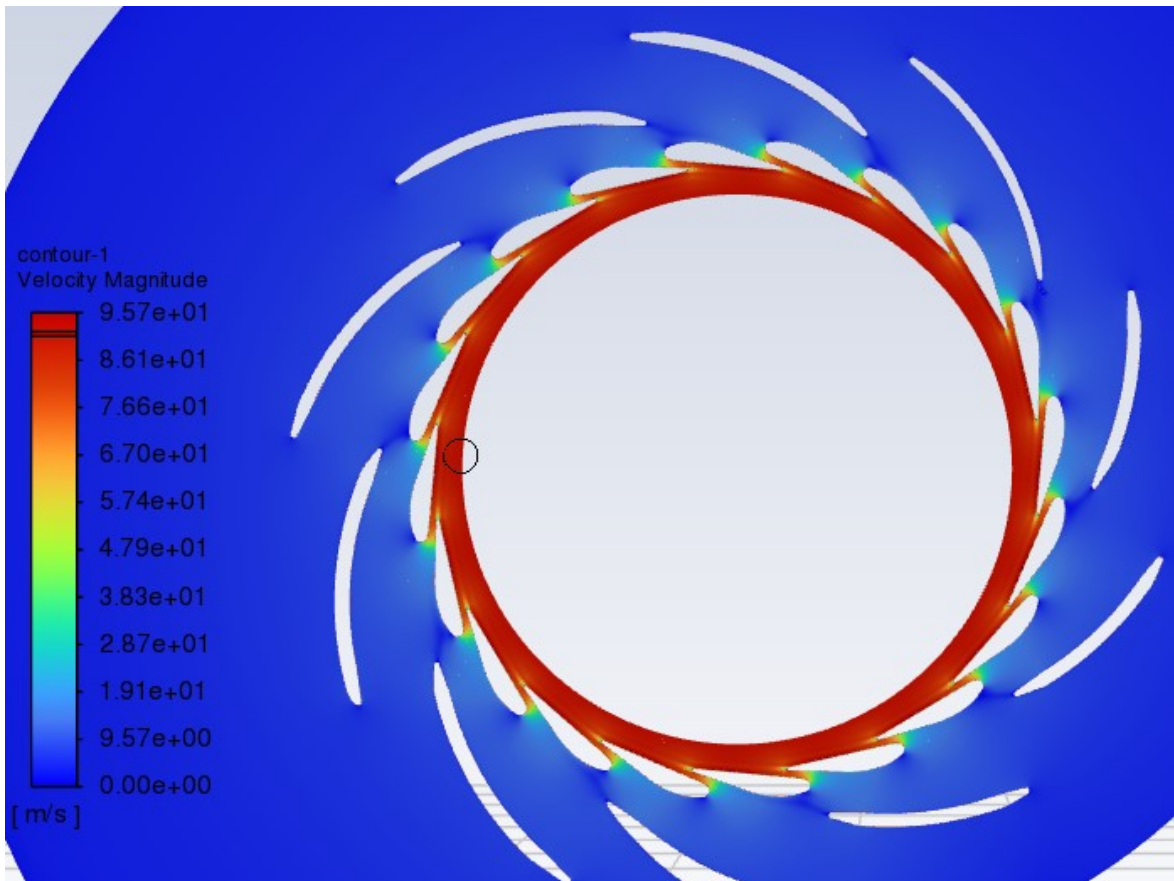
Za prikazivanje rezultata napravljena je iso površina u smjerz Z osi na polovici visine domene koja u 2D prikazuje ćelije konstantnih vrijednosti. Odabrane vrijednosti za prikaz u kreiranoj iso ravnini su, za sve slučajeve: magnituda brzine, radijalna i tangencijalna brzina te statički i totalni tlak. Slijedeći prikaz rezultata su vektori brzine i strujnice u različitim dijelovima domena slučajeva.

### 6.1 Vizualizacija rezultata za položaj privodećih lopatica od $4^\circ$

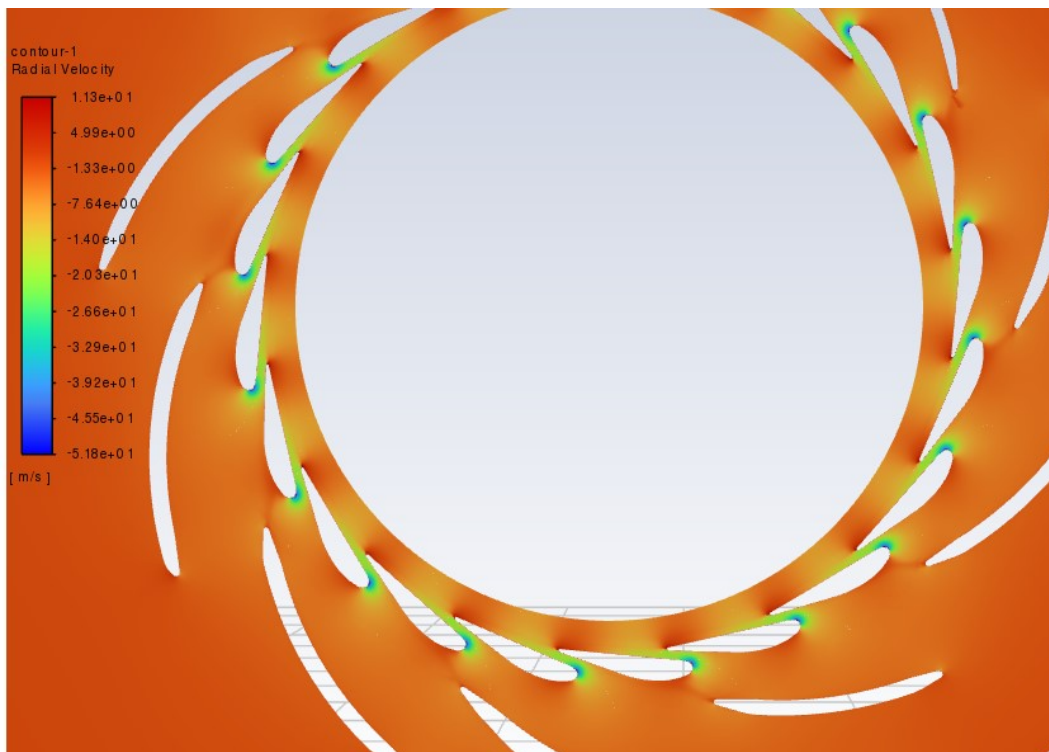


Slika 6-1 Reziduali numeričke analize

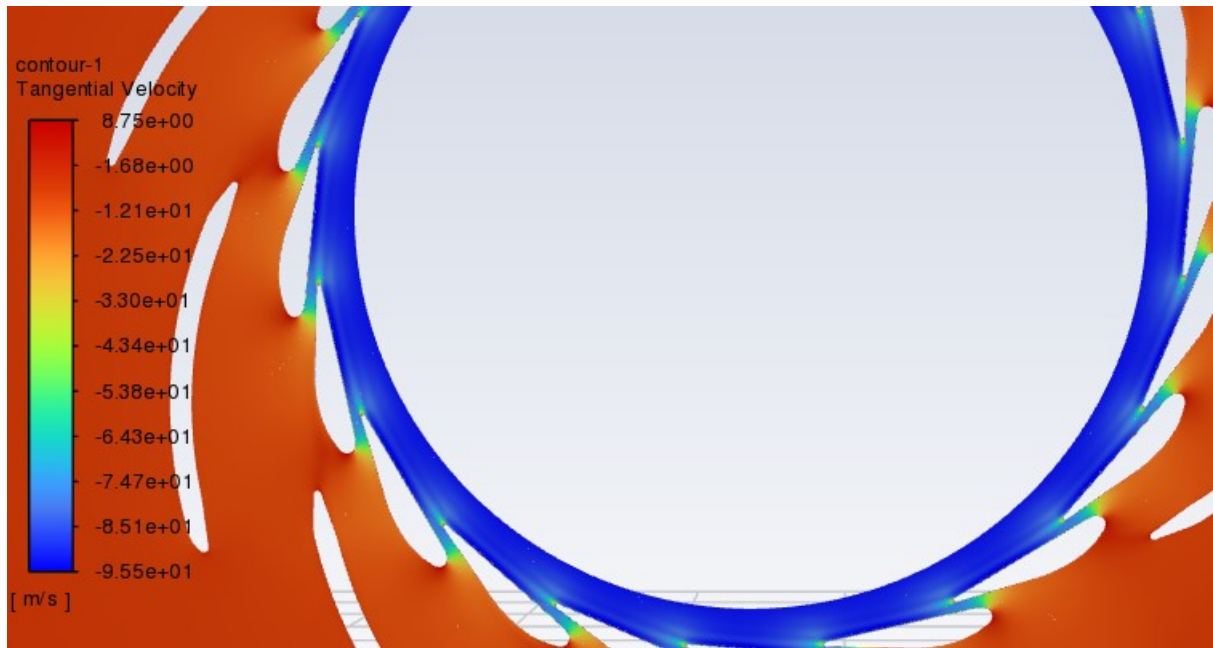




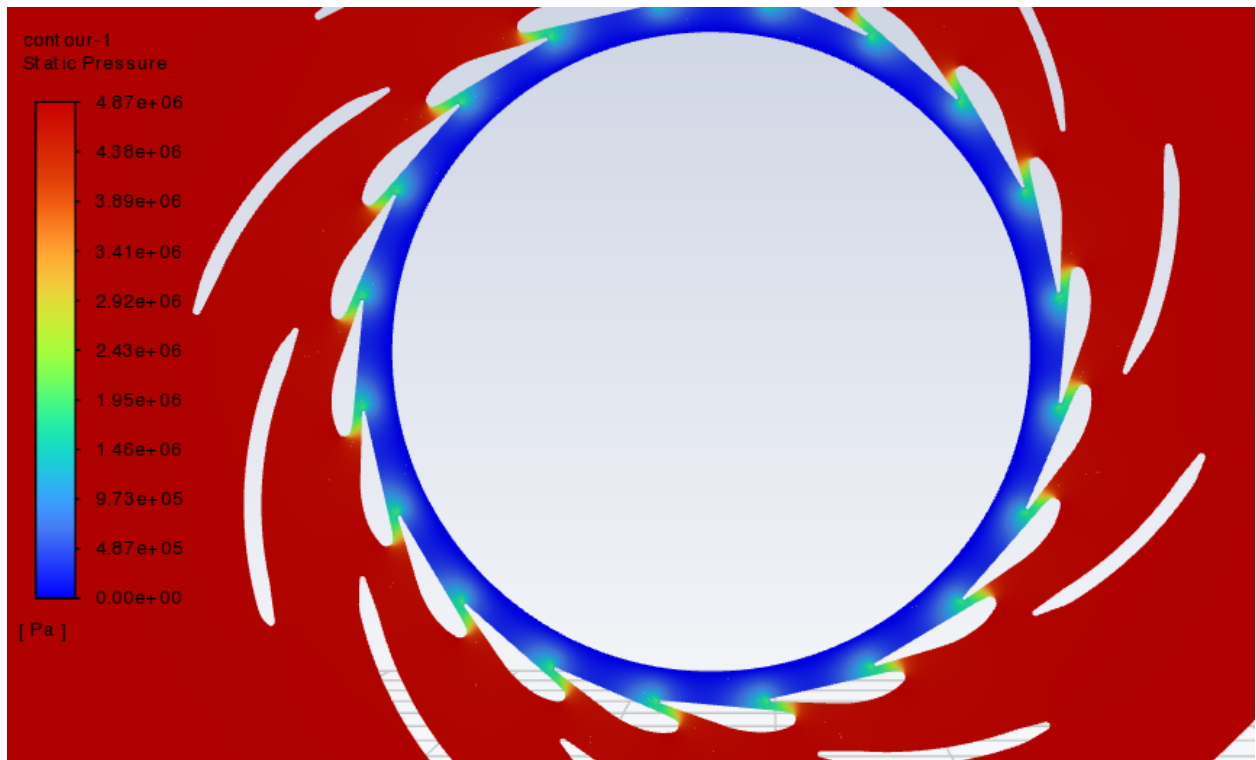
*Slika 6-2 Konture magnitude brzine u iso ravnini*



*Slika 6-3 Konture radijalne brzine u iso ravnini*



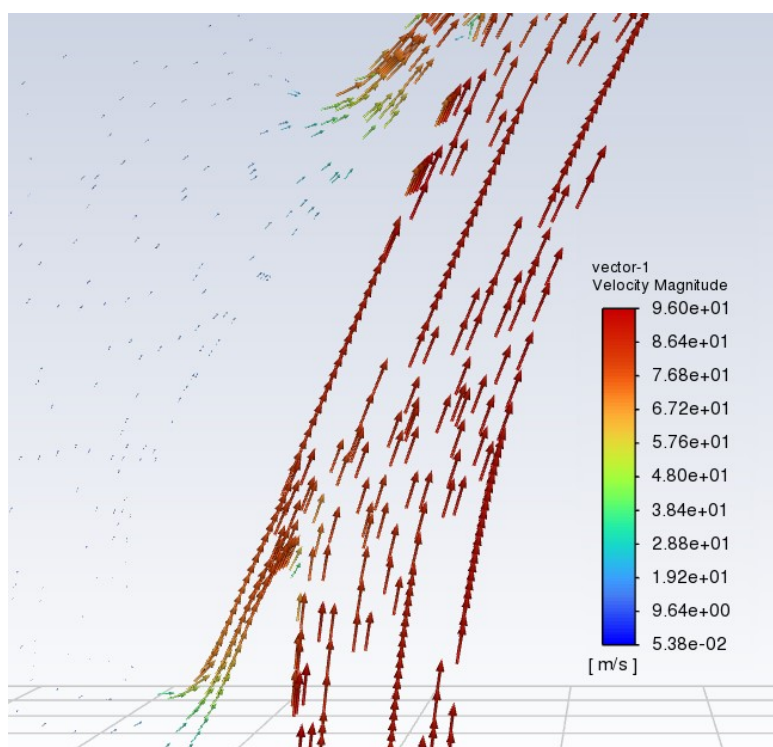
*Slika 6-4 Konture tangencijalne brzine u iso ravnini*



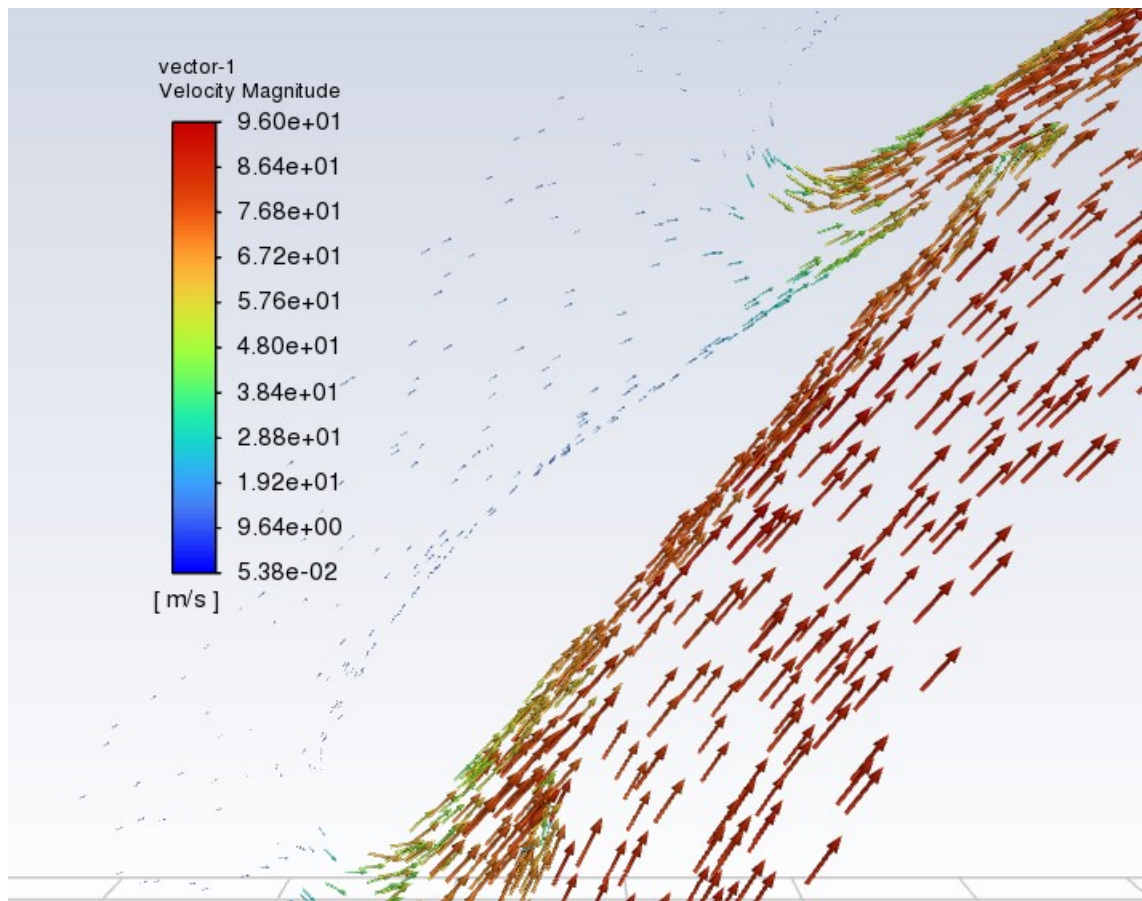
*Slika 6-5 Konture statičkog tlaka u iso ravnini*



*Slika 6-6 Konture totalnog tlaka u iso ravnini*

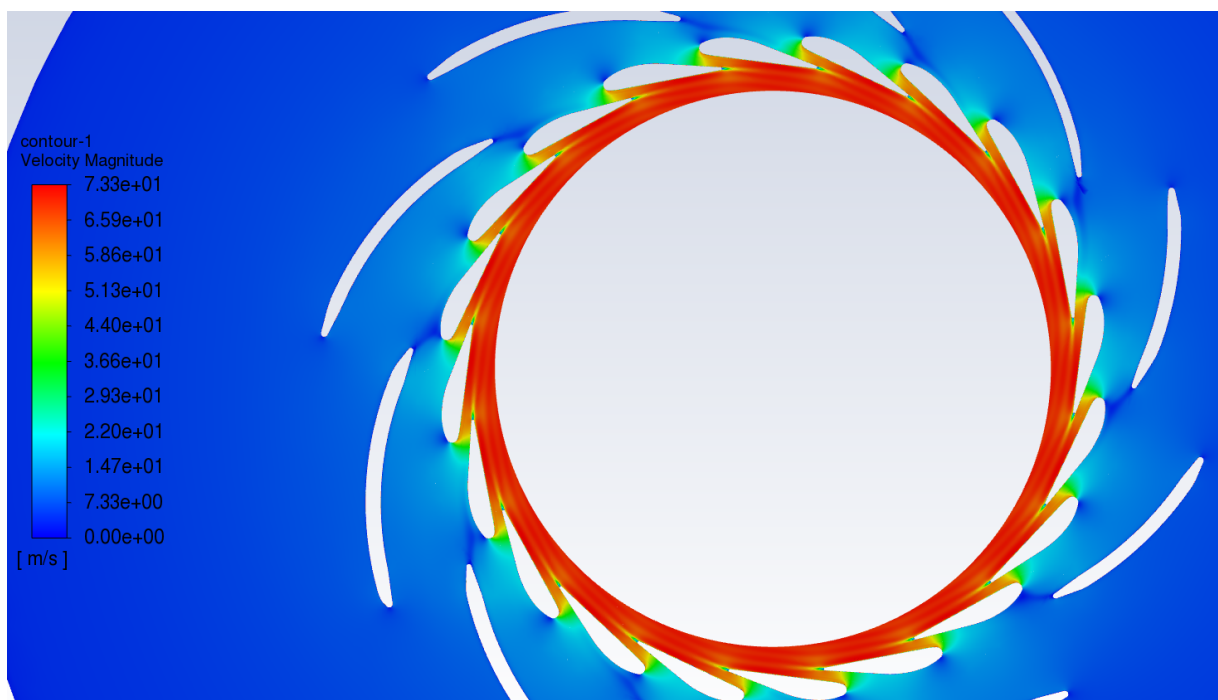


*Slika 6-7 Vektori brzine oko privodećih lopatica*

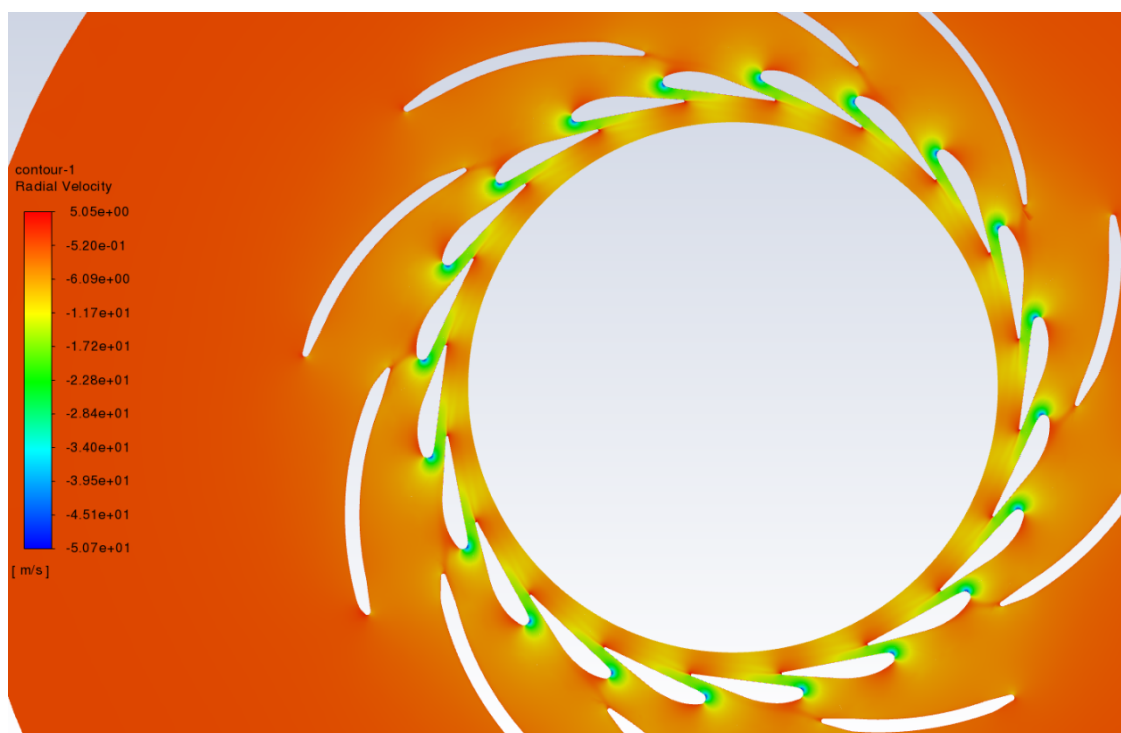


*Slika 6-8 Vektori brzine oko privodećih lopatica - detalj*

## 6.2 Vizualizacija rezultata za položaj privodećih lopatica od 6°

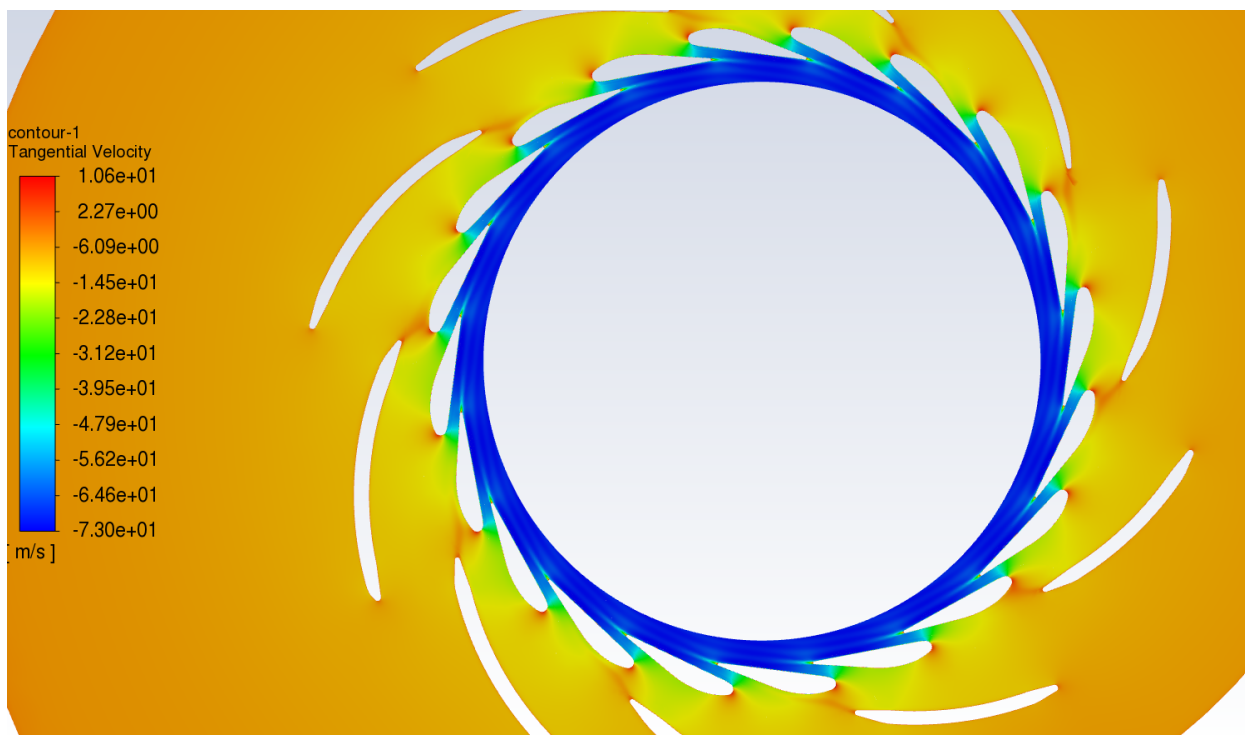


Slika 6-9 Konture magnitude brzine u iso ravnini

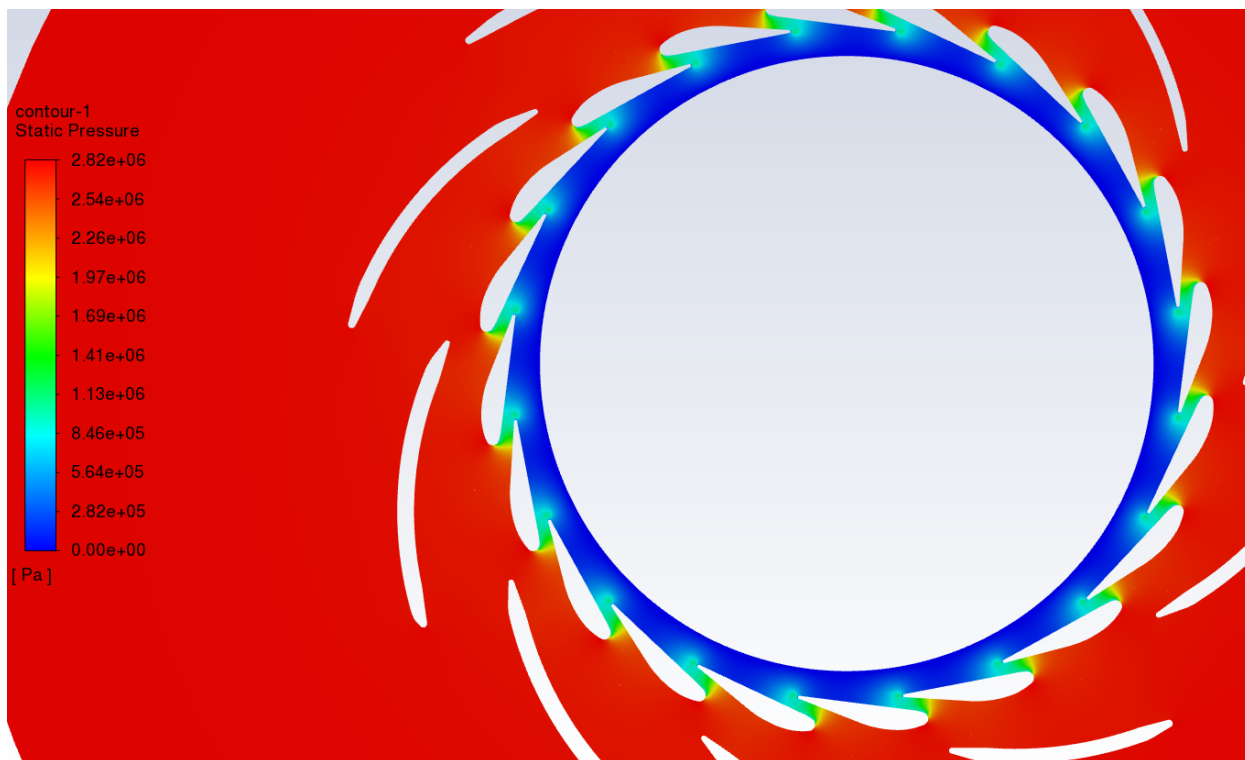


Slika 6-10 Konture radijalne brzine u iso ravnini





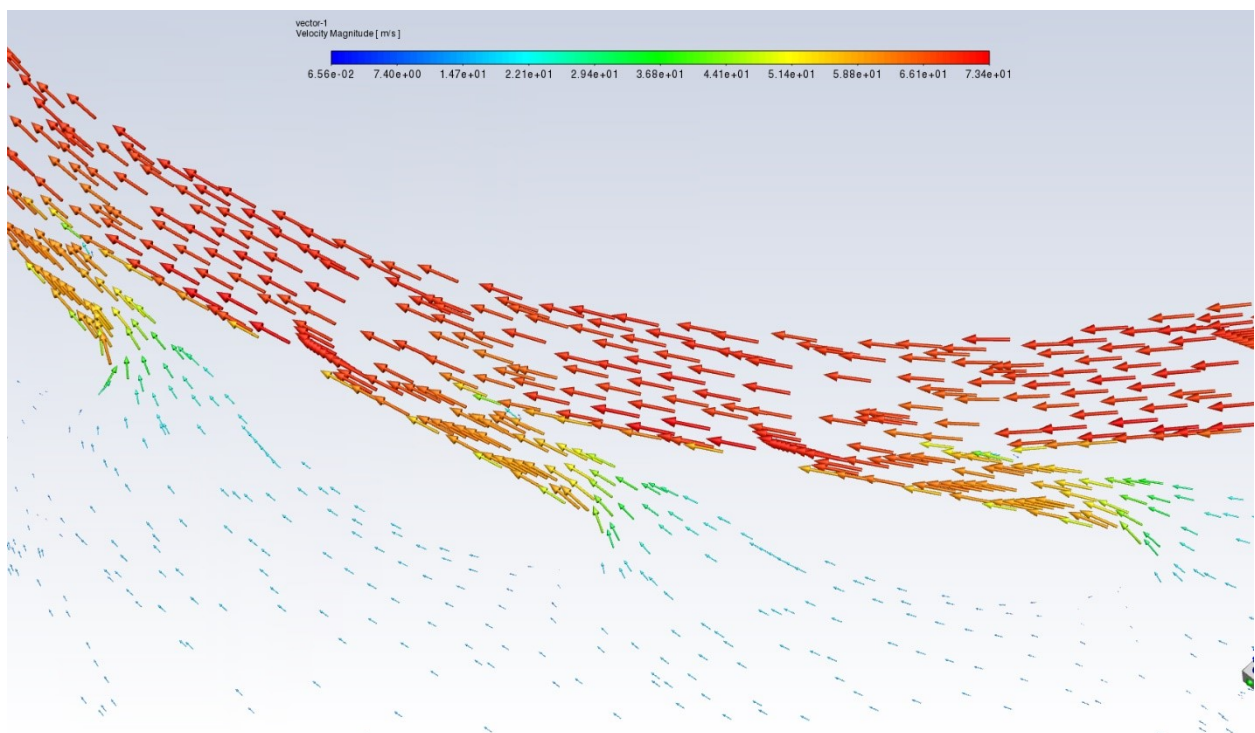
*Slika 6-11 Konture tangencijalne brzine u iso ravnini*



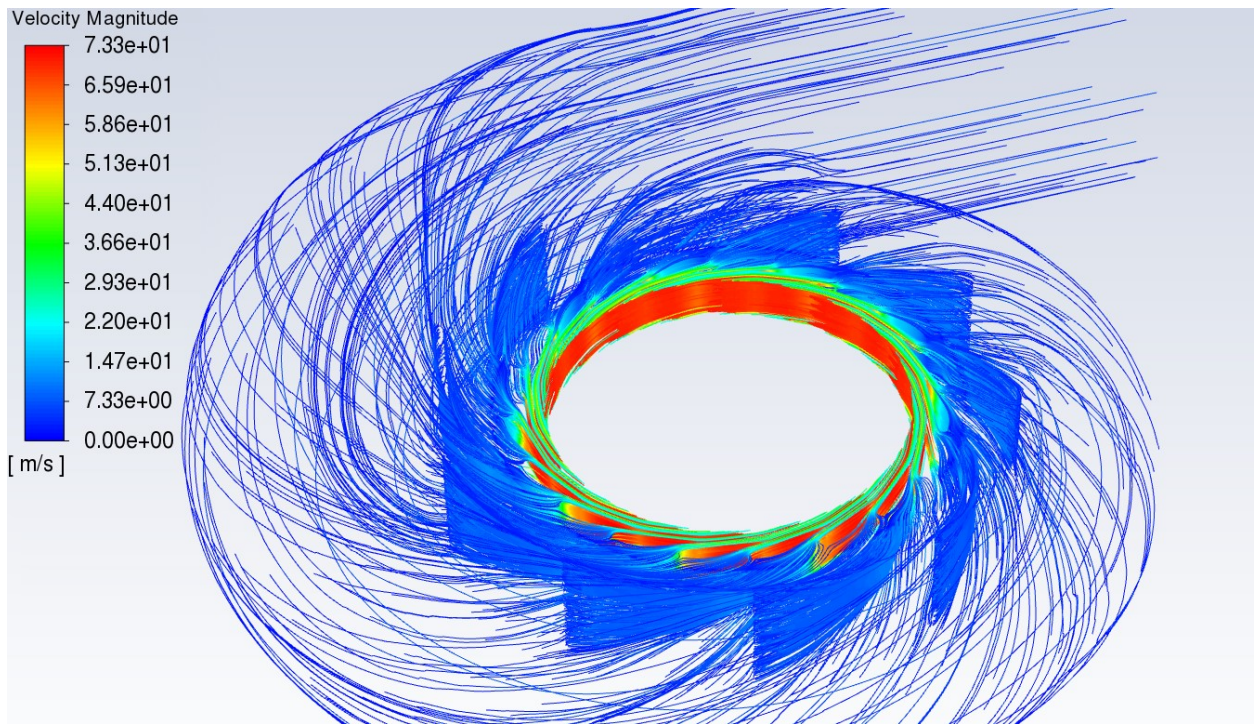
*Slika 6-12 Konture statičkog tlaka u iso ravnini*



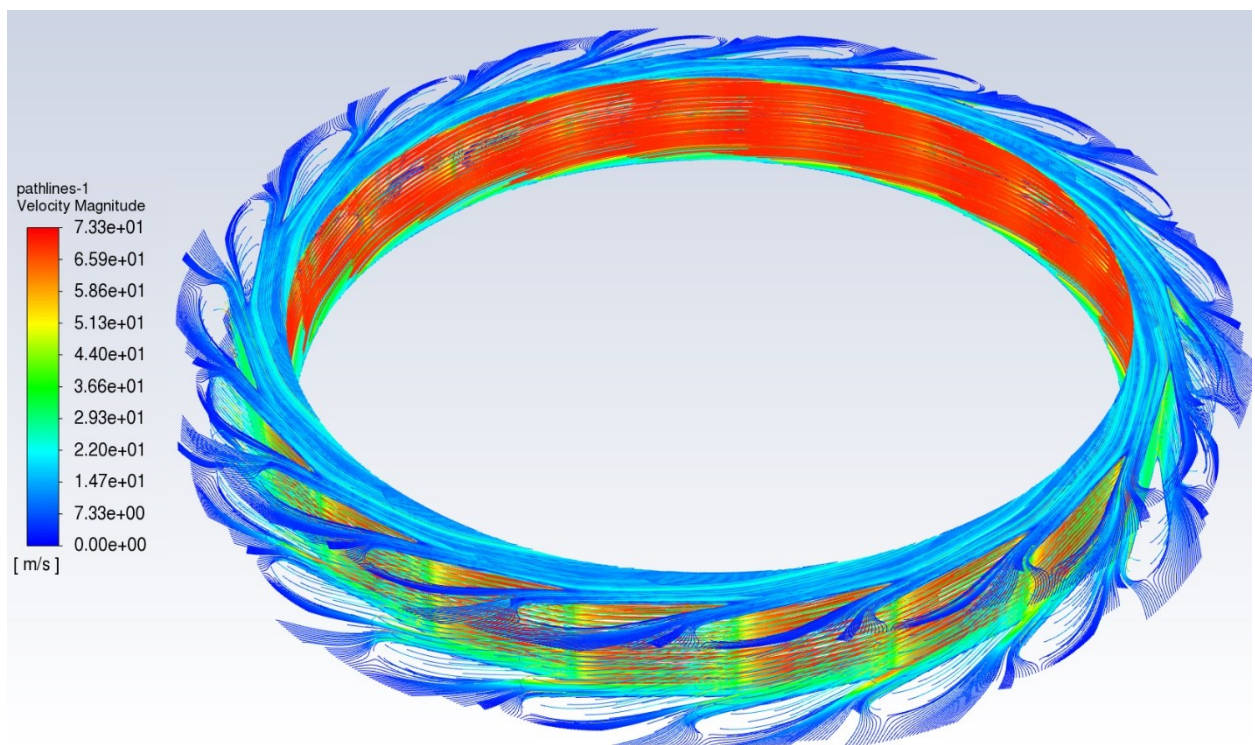
*Slika 6-13 Konture totalnog tlaka u iso ravnini*



*Slika 6-14 Vektori brzine oko privodećih lopatica*



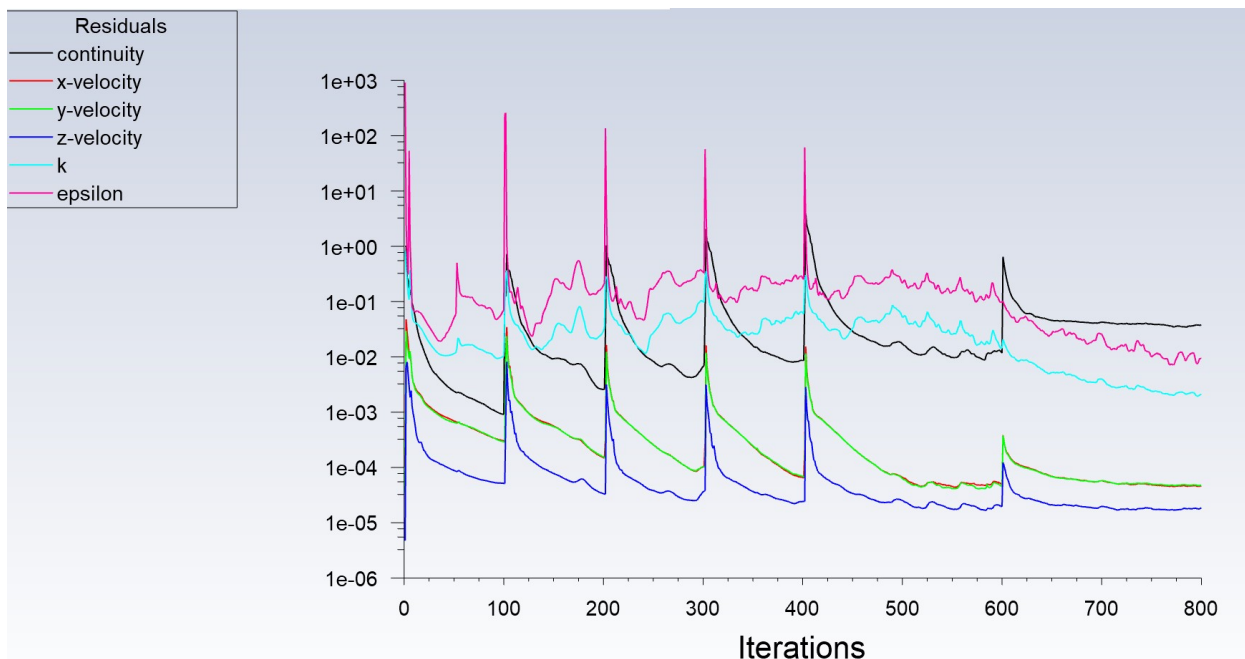
*Slika 6-15 Strujnice brzine na domeni spirale*



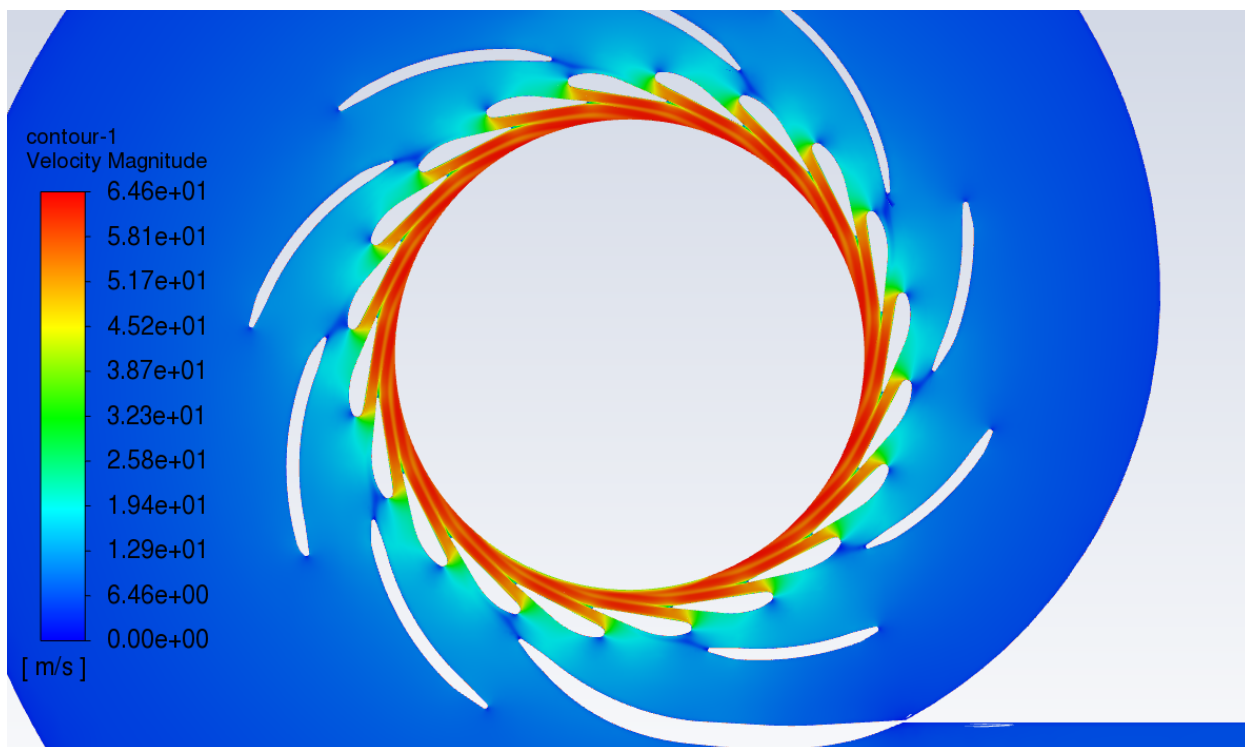
*Slika 6-16 Strujnice brzine na domeni privodećih lopatica*



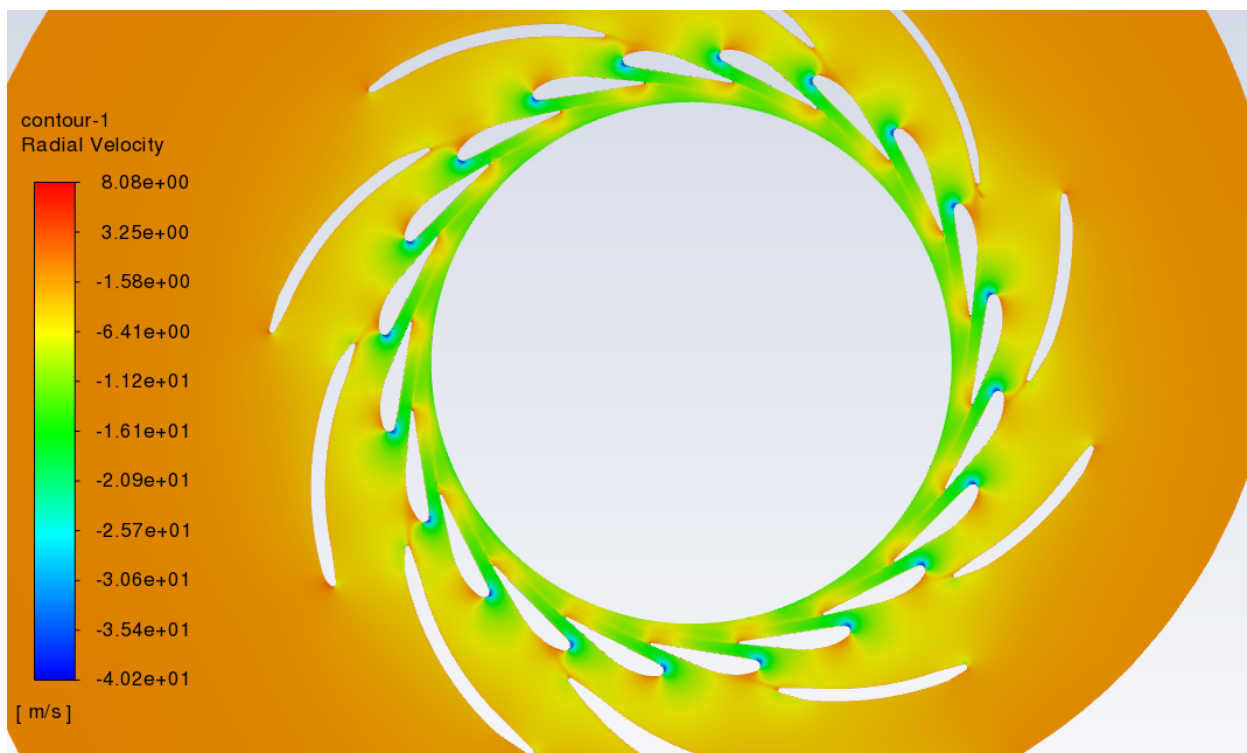
### 6.3 Vizualizacija rezultata za položaj privodećih lopatica od 8°



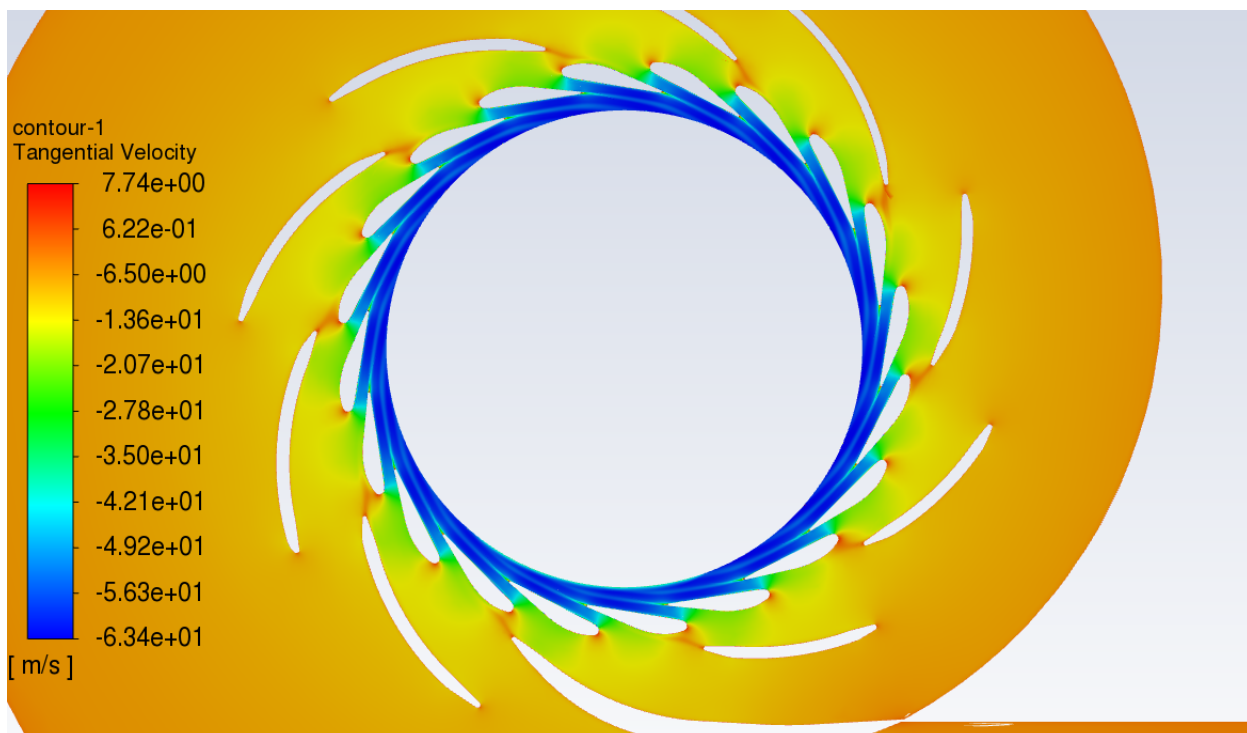
Slika 6-17 Reziduali numeričke analize



Slika 6-18 Konture magnitude brzine u iso ravnini



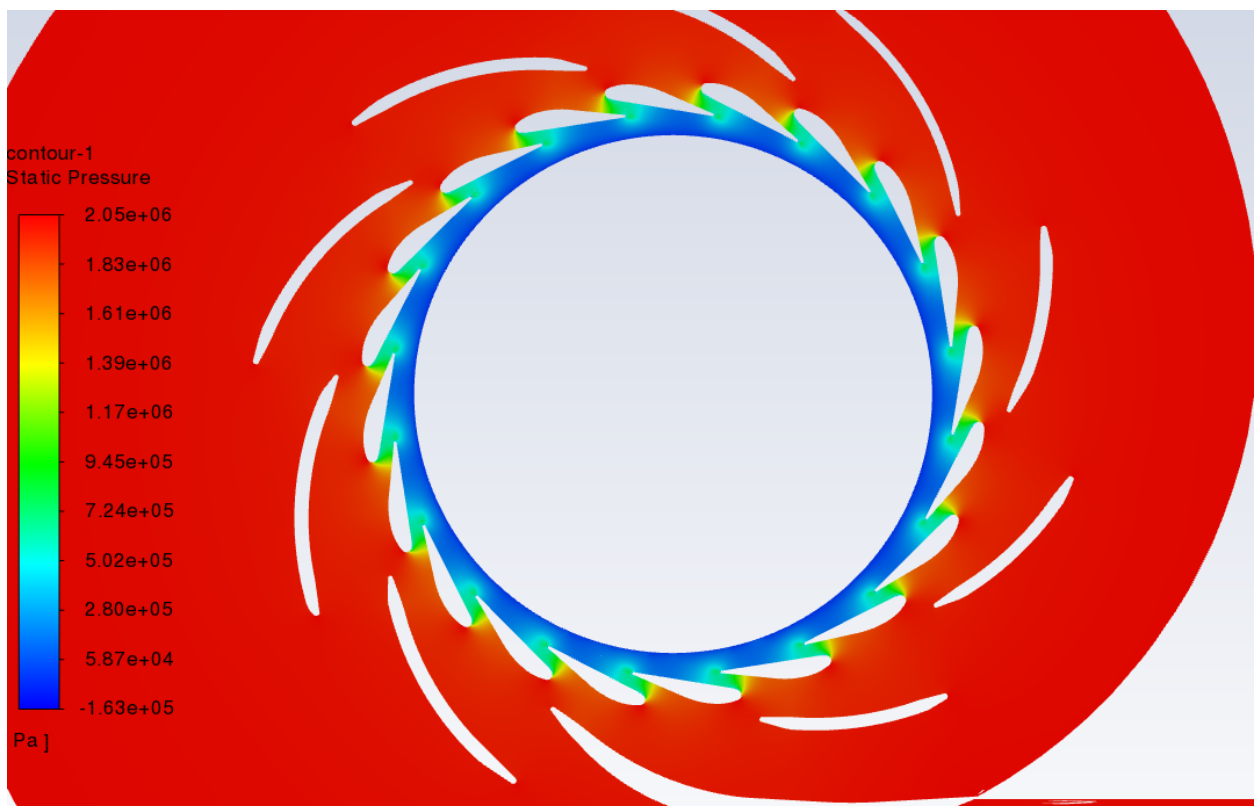
*Slika 6-19 Konture radijalne brzine u iso ravnini*



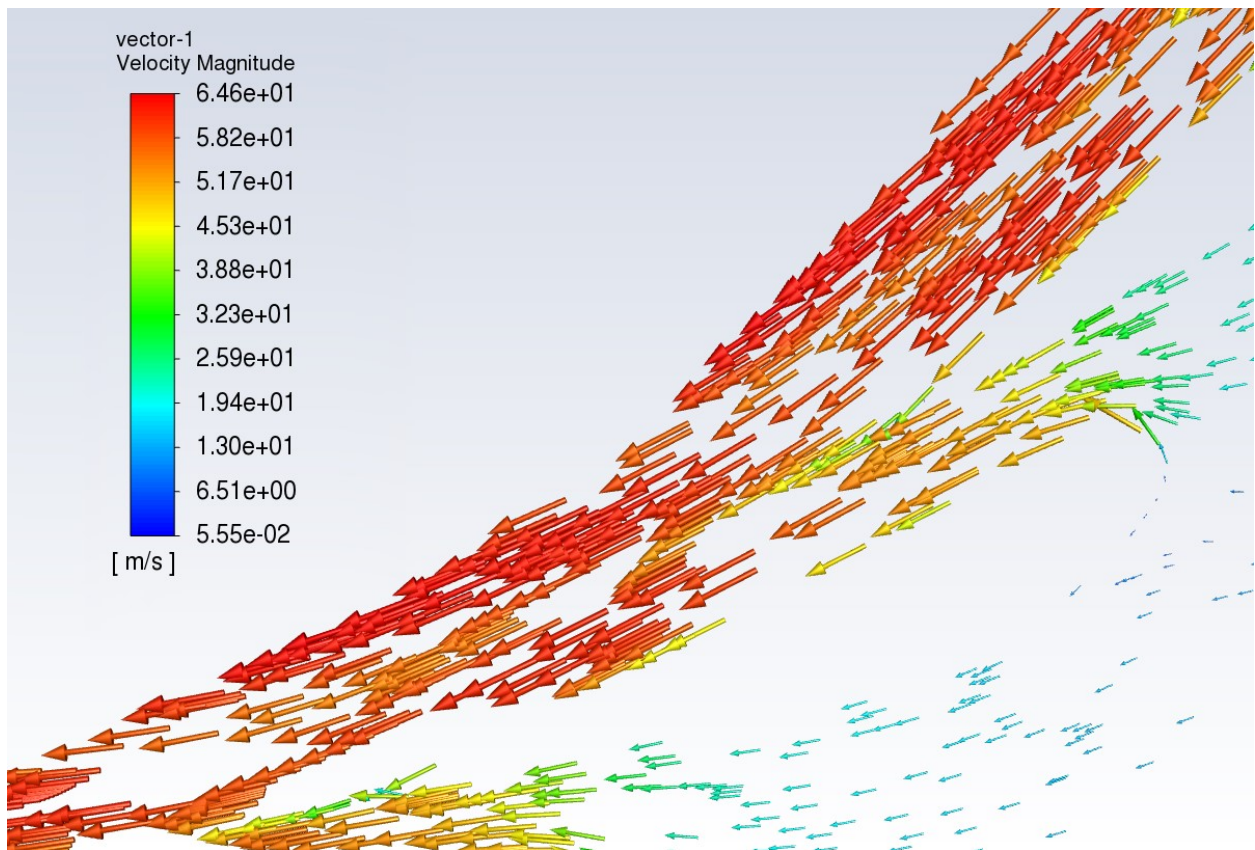
*Slika 6-20 Konture tangencijalne brzine u iso ravnini*



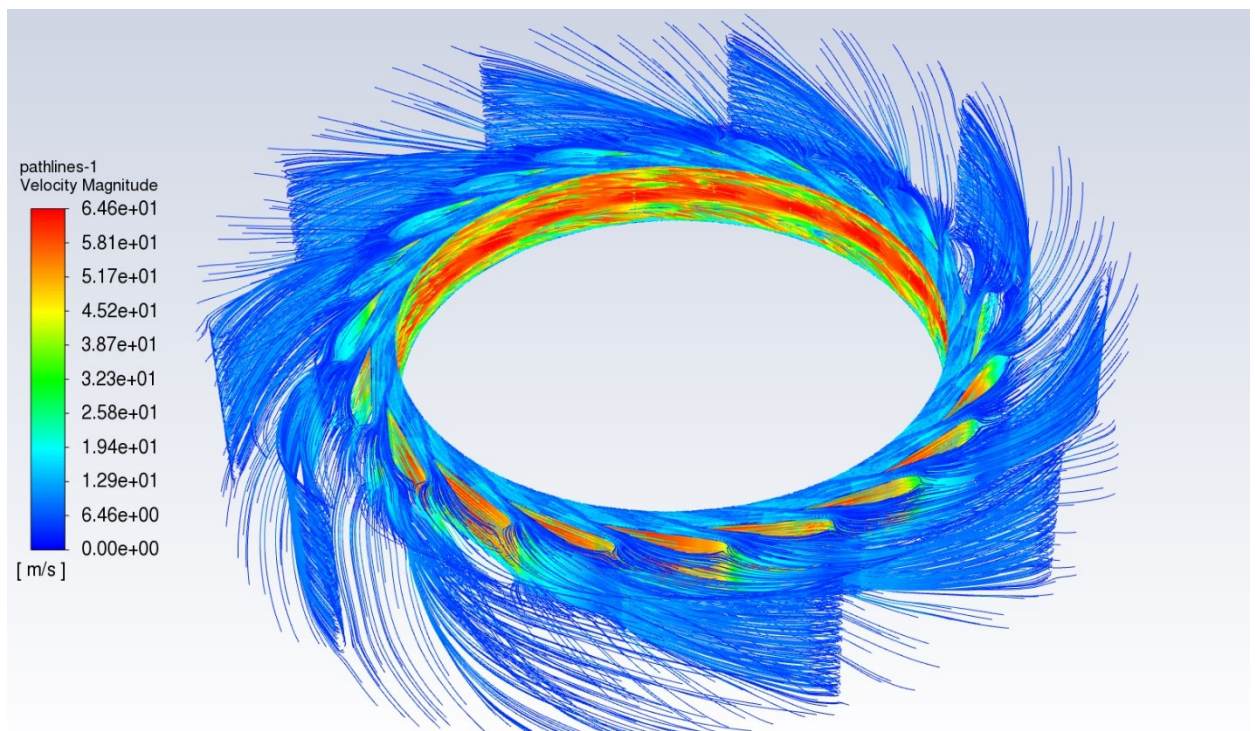
*Slika 6-21 Konture totalnog tlaka u iso ravnini*



*Slika 6-22 Konture statičkog tlaka u iso ravnini*



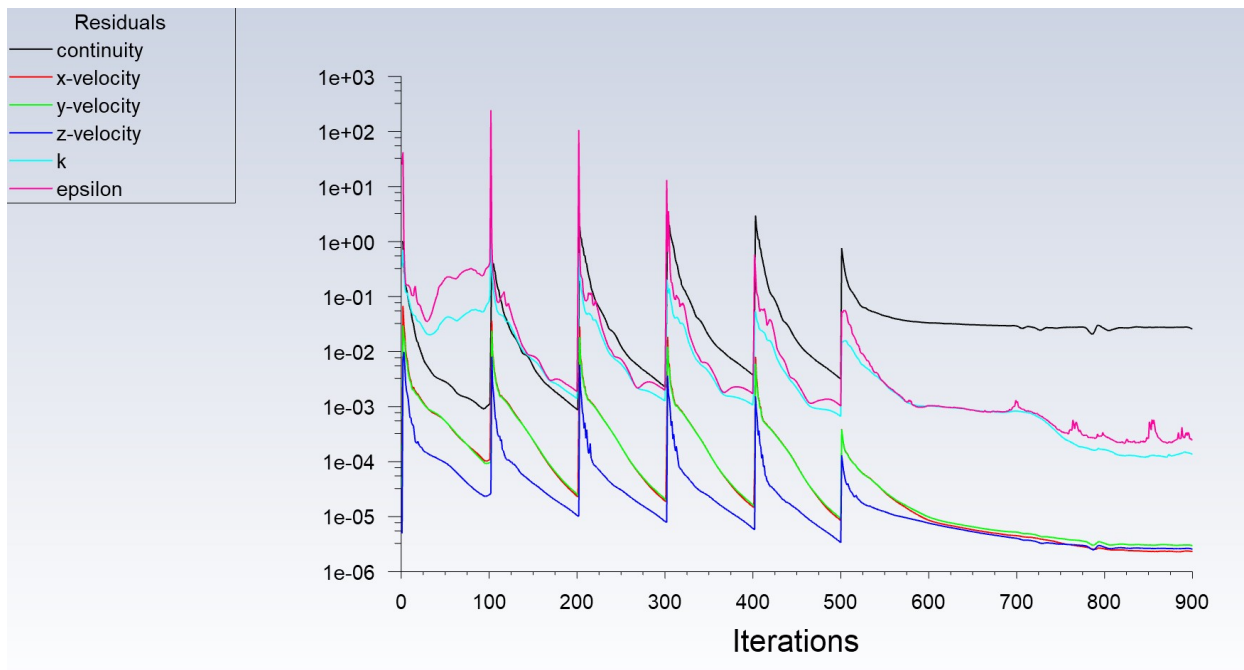
*Slika 6-23 Vektori brzine oko privodećih lopatica*



*Slika 6-24 Strujnice brzine na domeni predprivodećih lopatica*



## 6.4 Vizualizacija rezultata za položaj privodećih lopatica od $10^\circ$



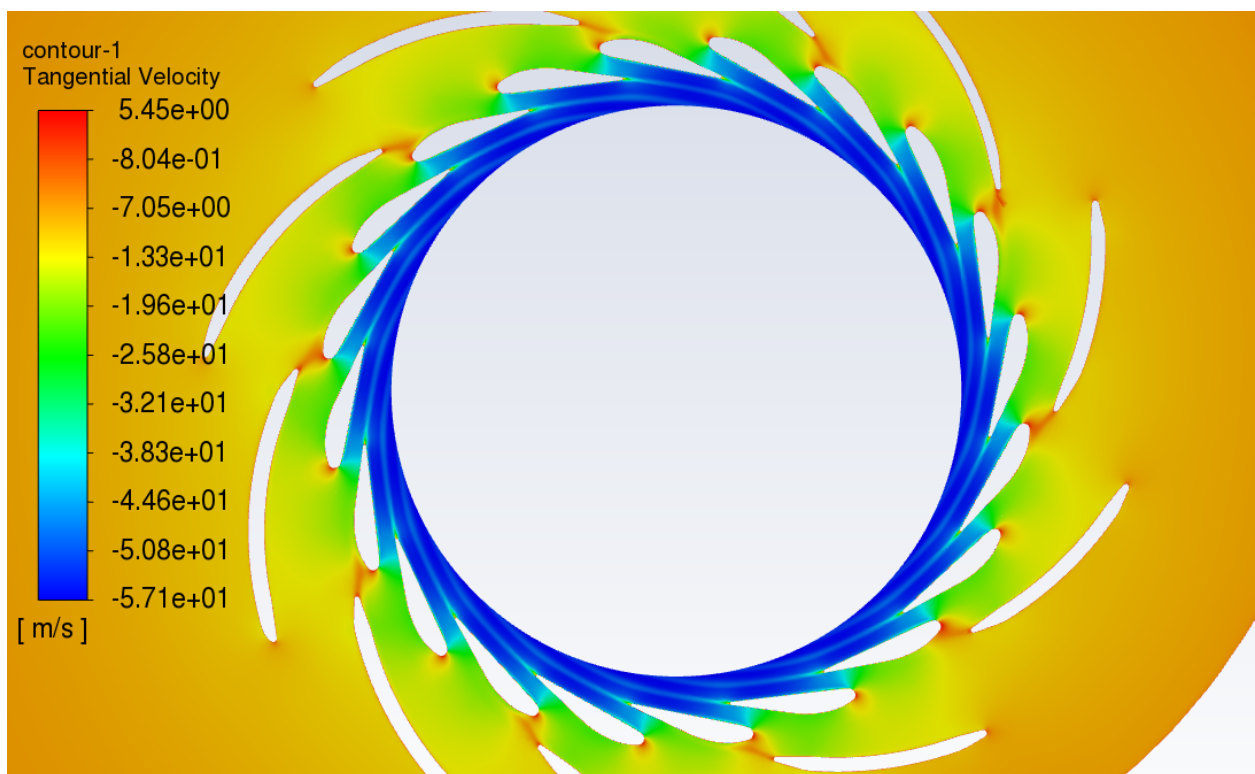
Slika 6-25 Reziduali numeričke analize



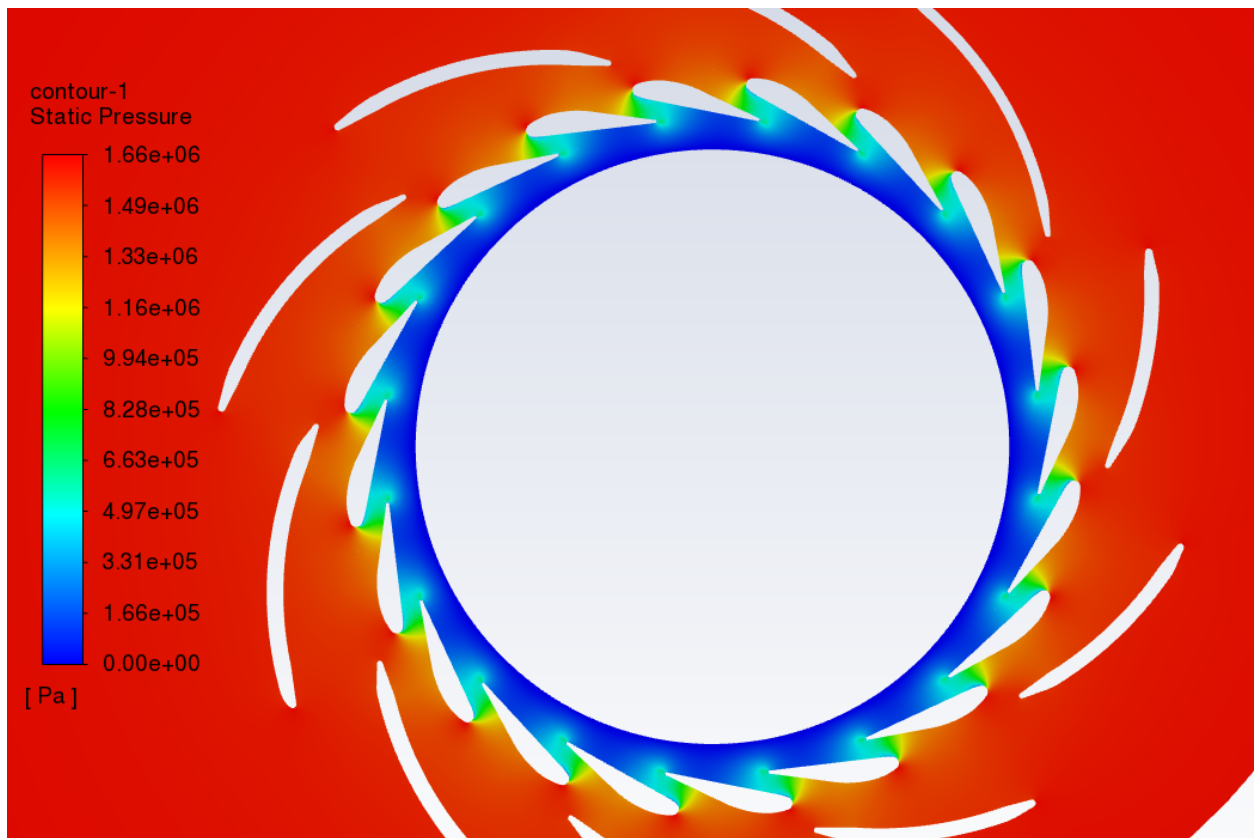
Slika 6-26 Konture magnitude brzine u iso ravnini



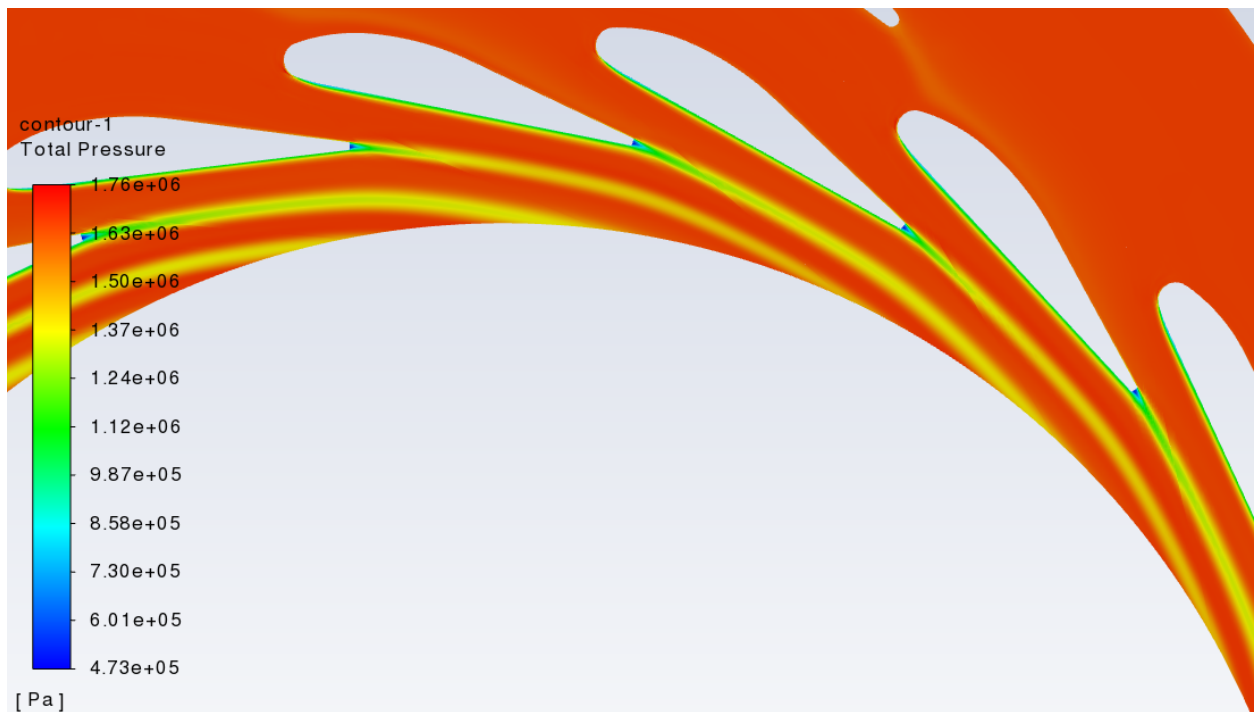
*Slika 6-27 Konture radijalne brzine u iso ravnini*



*Slika 6-28 Konture tangencijalne brzine u iso ravnini*

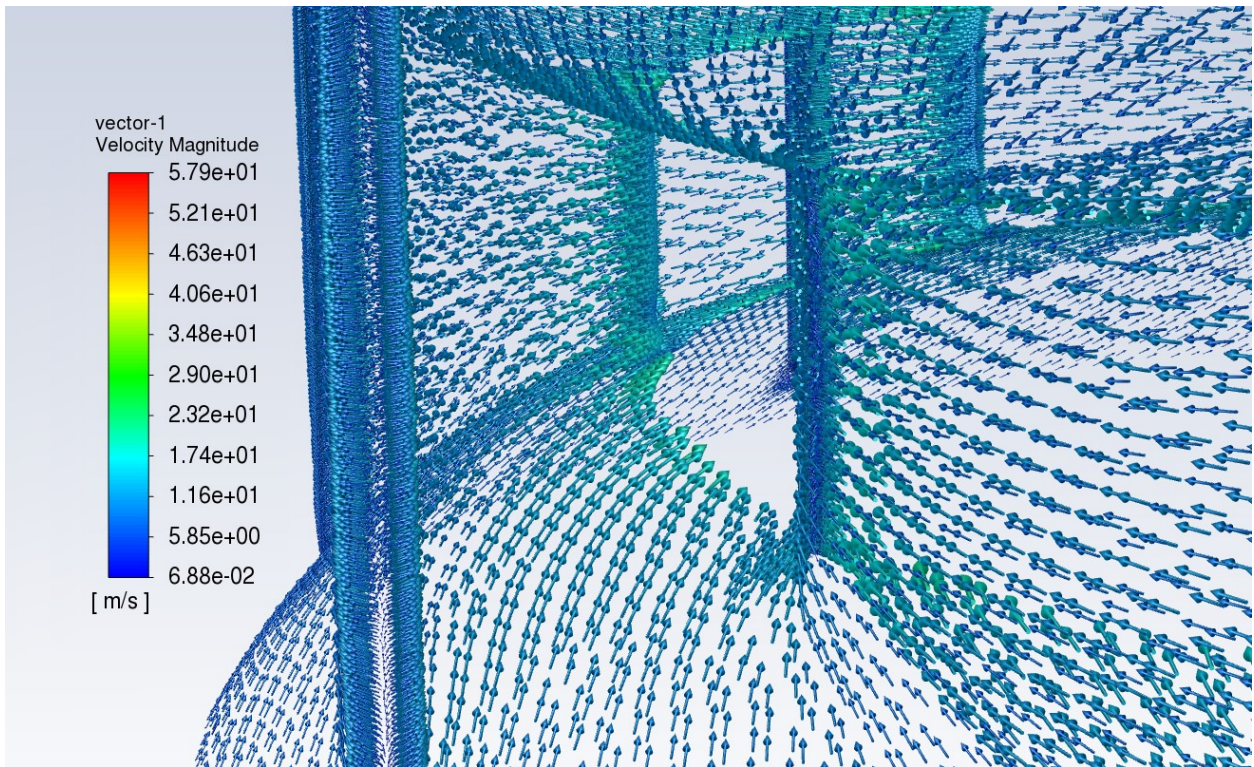


*Slika 6-29 Konture statičkog tlaka u iso ravnini*

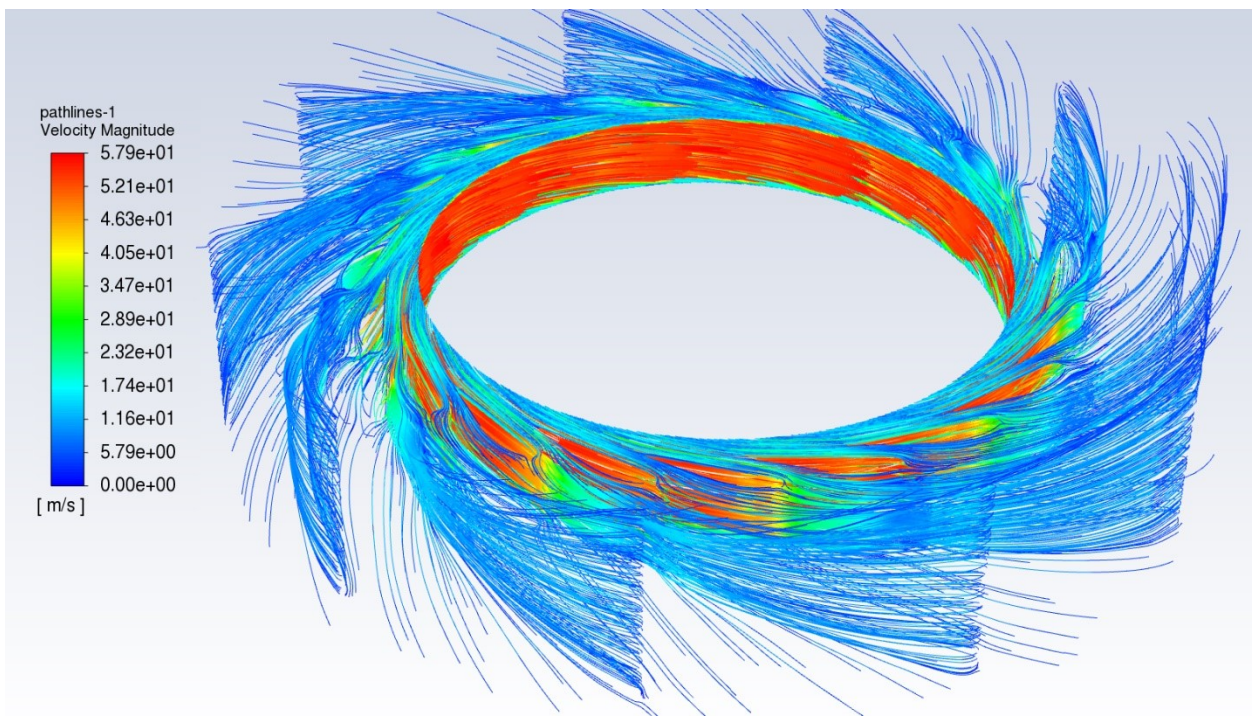


*Slika 6-30 Konture totalnog tlaka u iso ravnini*



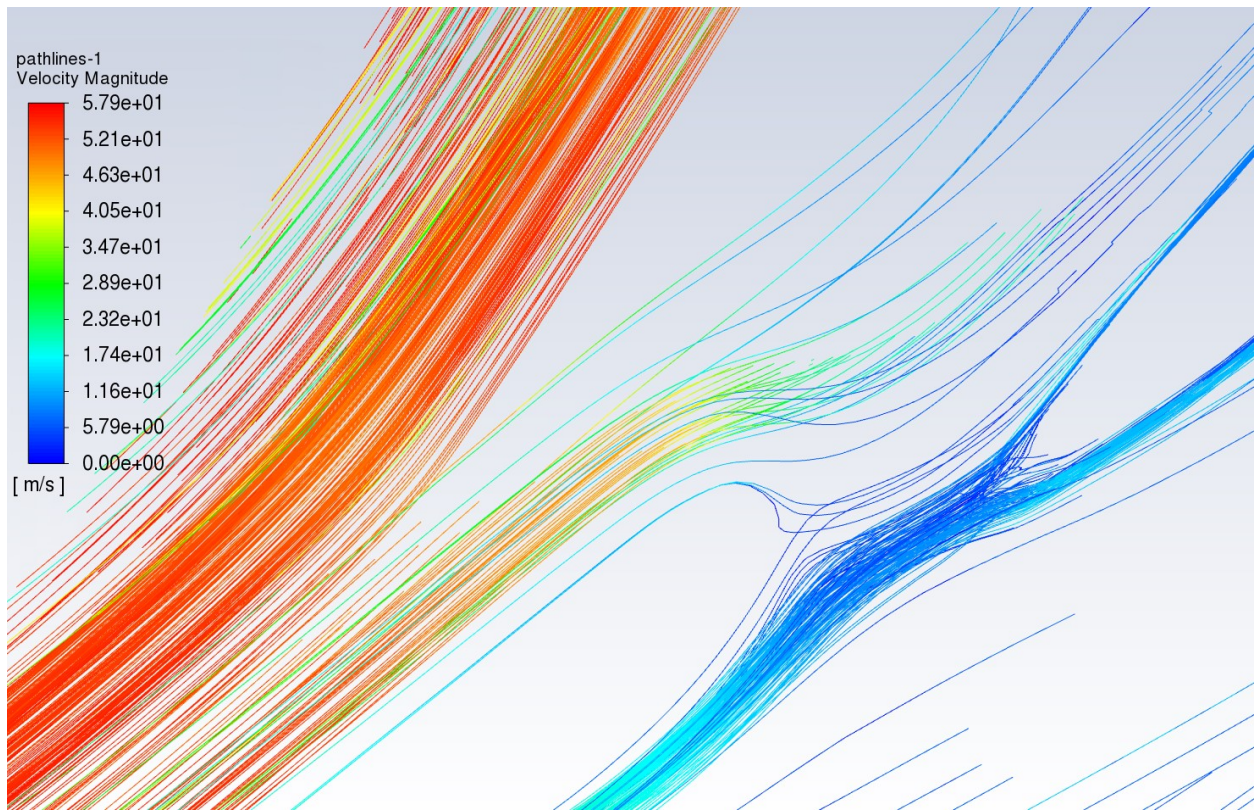


*Slika 6-31 Vektori brzine na ulasku u privodeće kolo*



*Slika 6-32 Strujnice brzine na domeni predprivodećih lopatica*



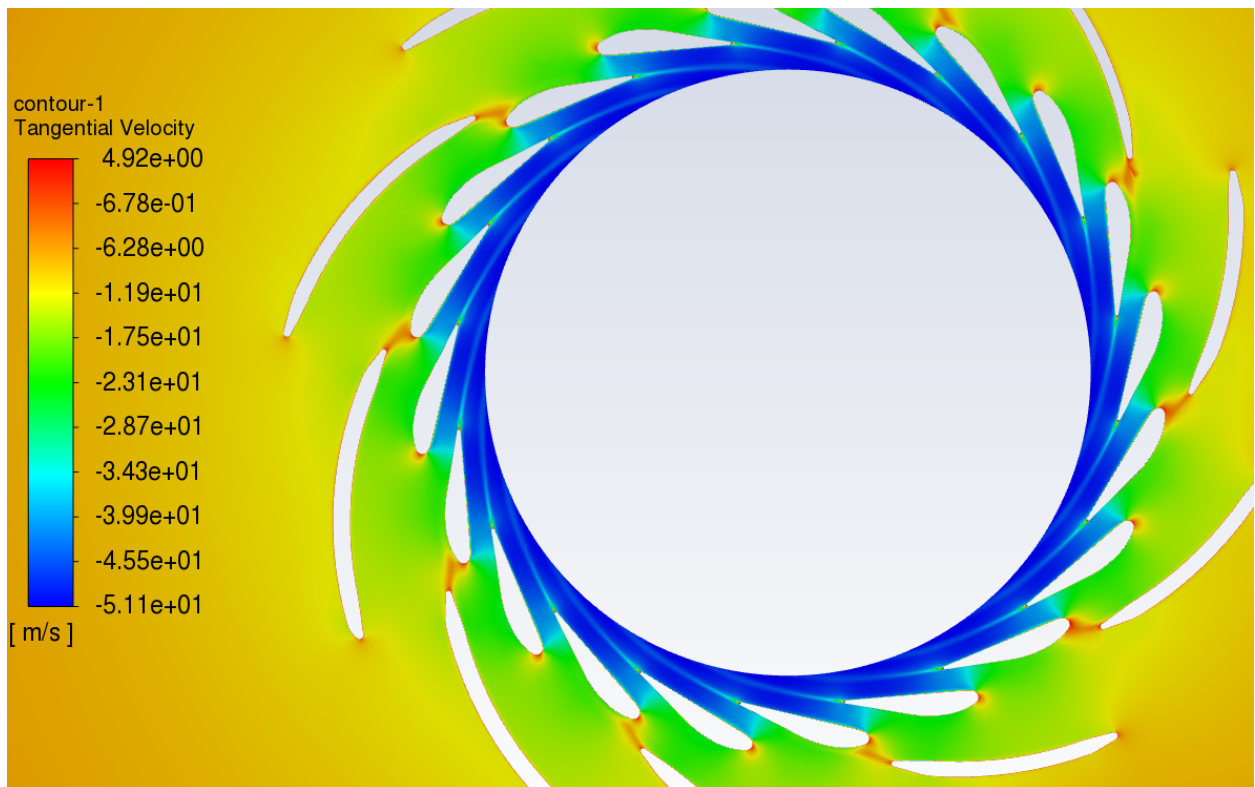


*Slika 6-33 Strujnice brzine u području između predprivodećih lopatica*

## 6.5 Vizualizacija rezultata za položaj privodećih lopatica od 12°



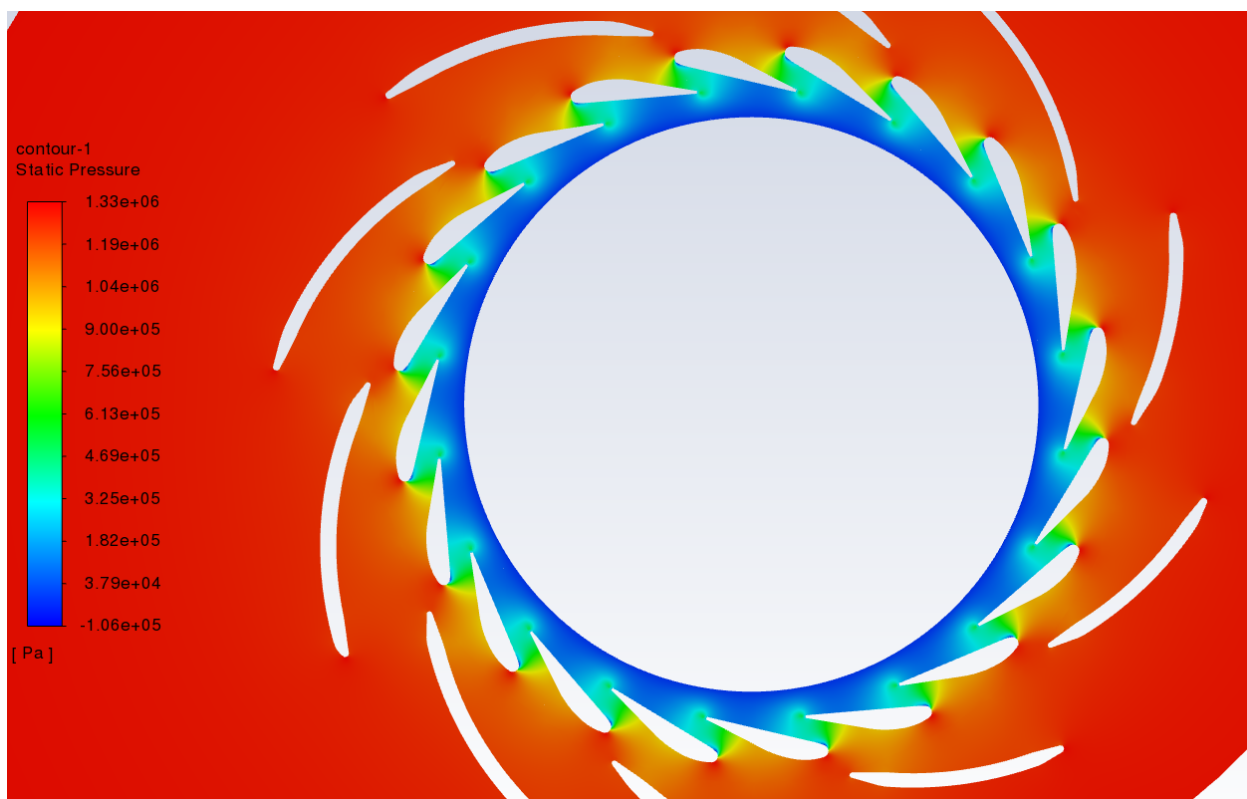
*Slika 6-34 Konture magnitude brzine u iso ravnini*



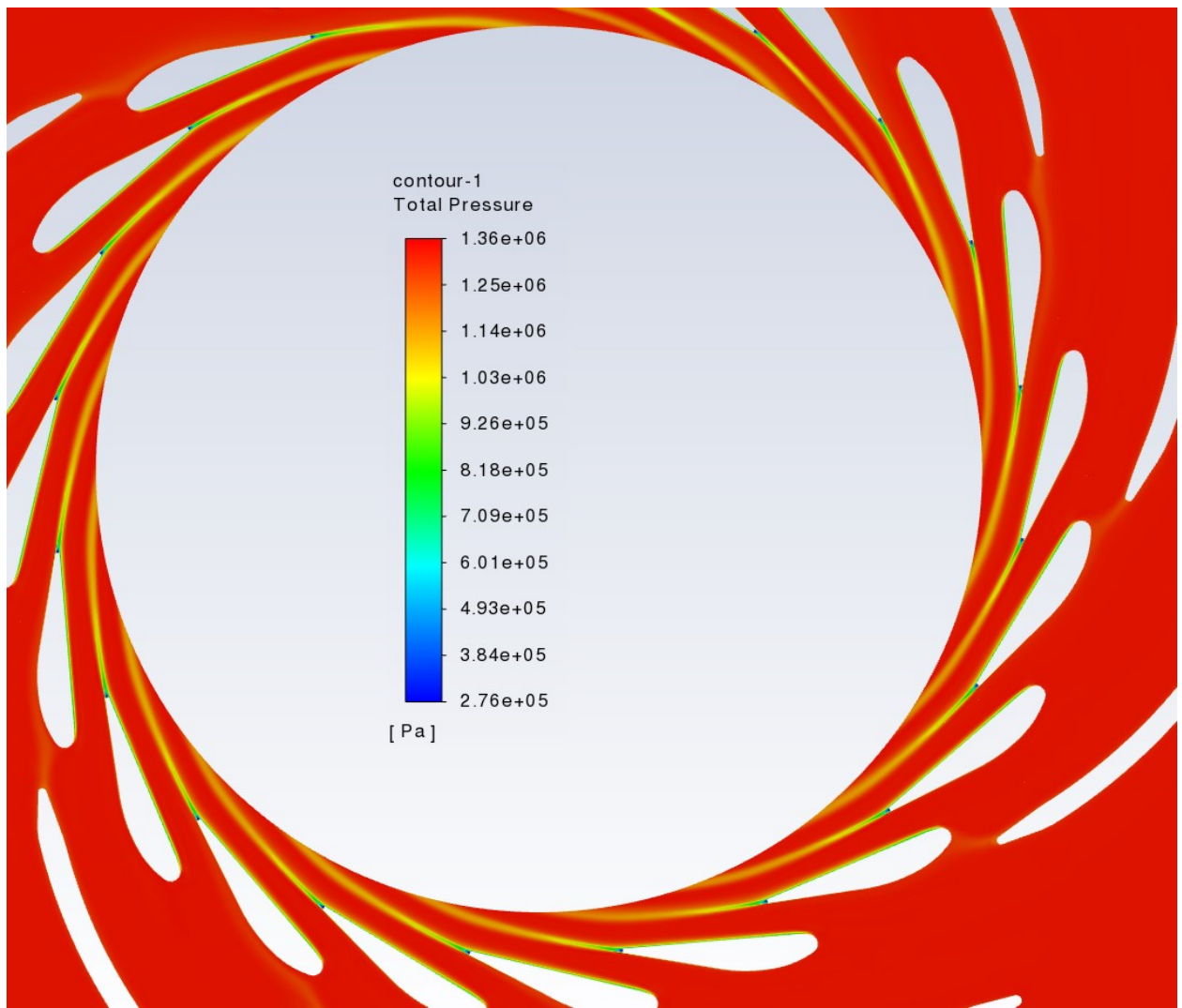
*Slika 6-35 Konture tangencijalne brzine u iso ravnini*



*Slika 6-36 Konture radijalne brzine u iso ravnini*

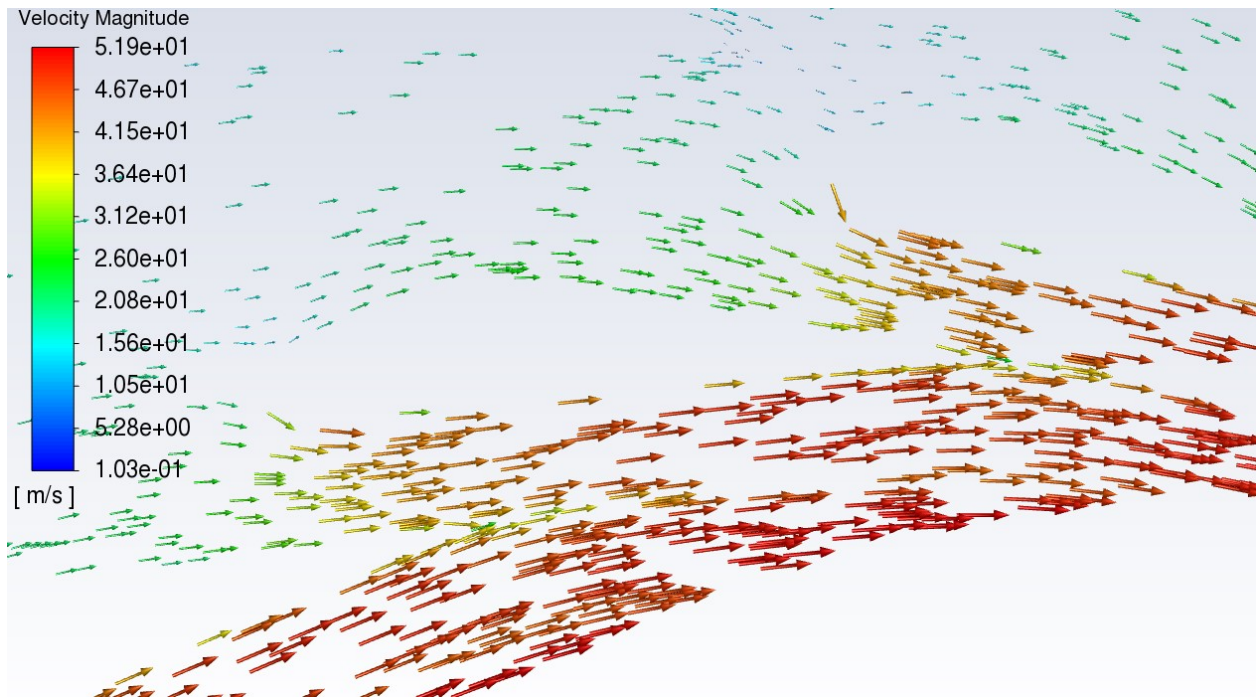


*Slika 6-37 Konture statičkog tlaka u iso ravnini*

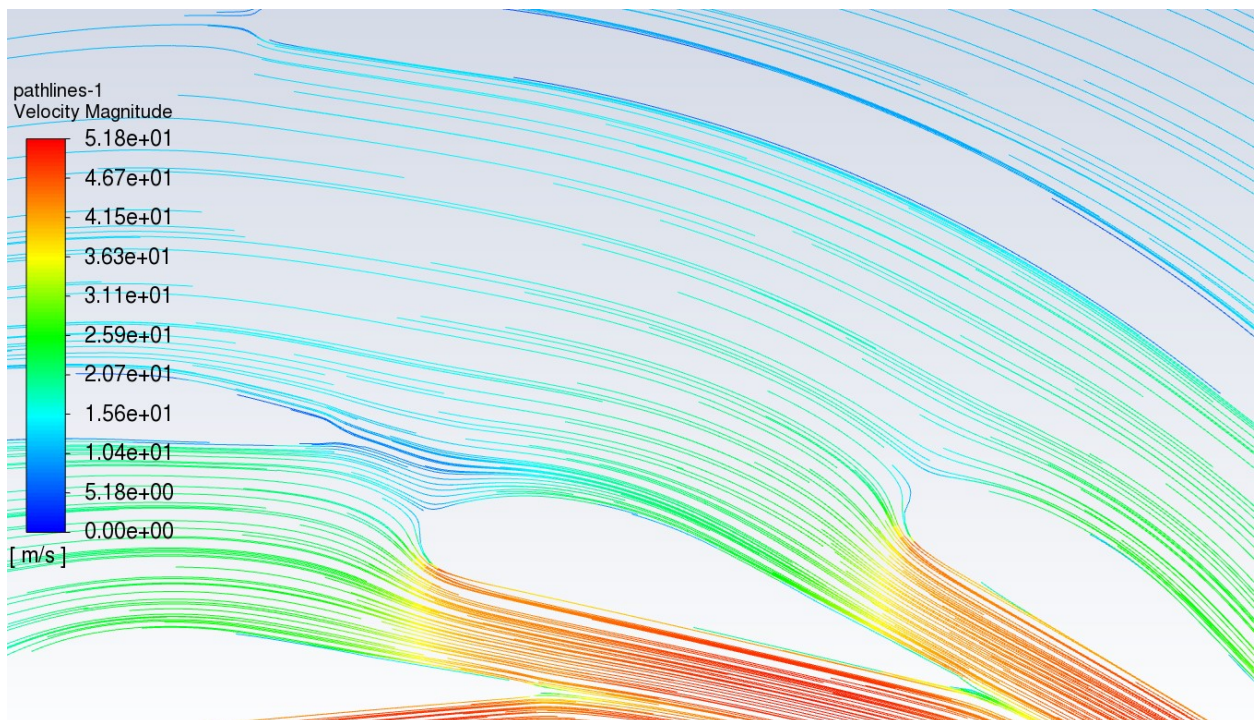


*Slika 6-38 Konture totalnog tlaka u iso ravnini*



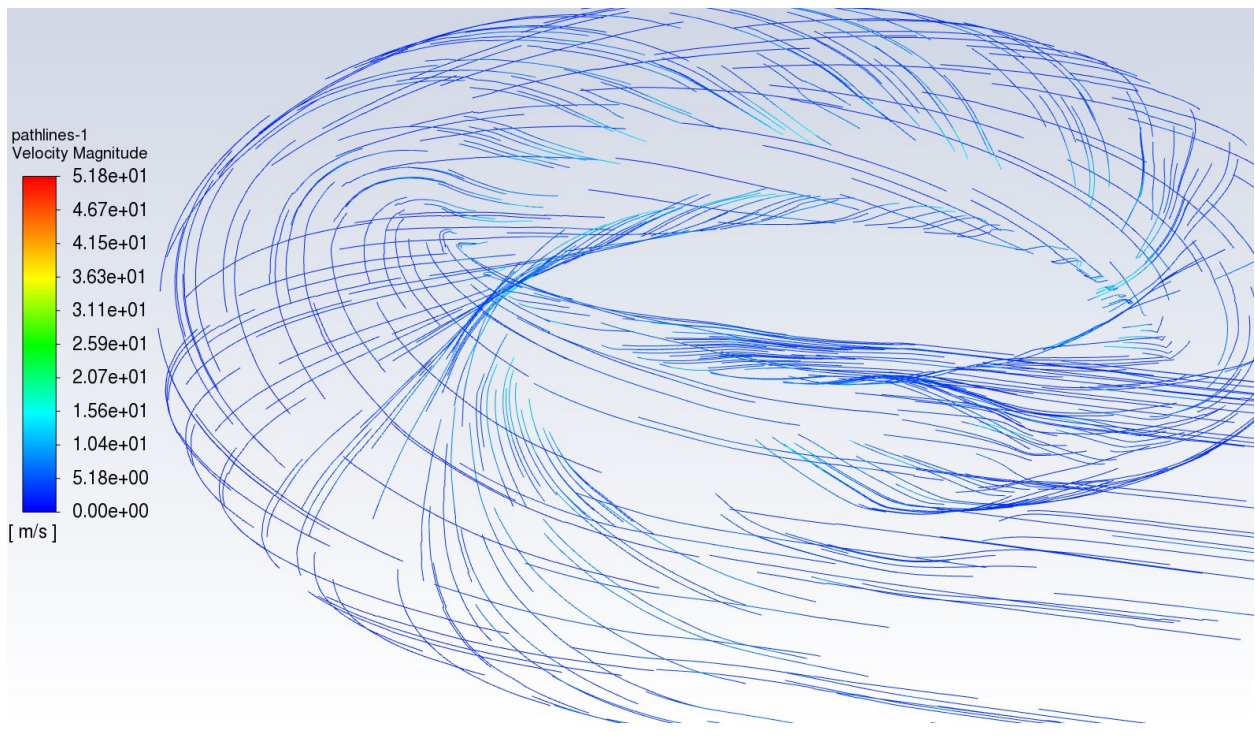


Slika 6-39 Vektori brzine oko privodećih lopatica

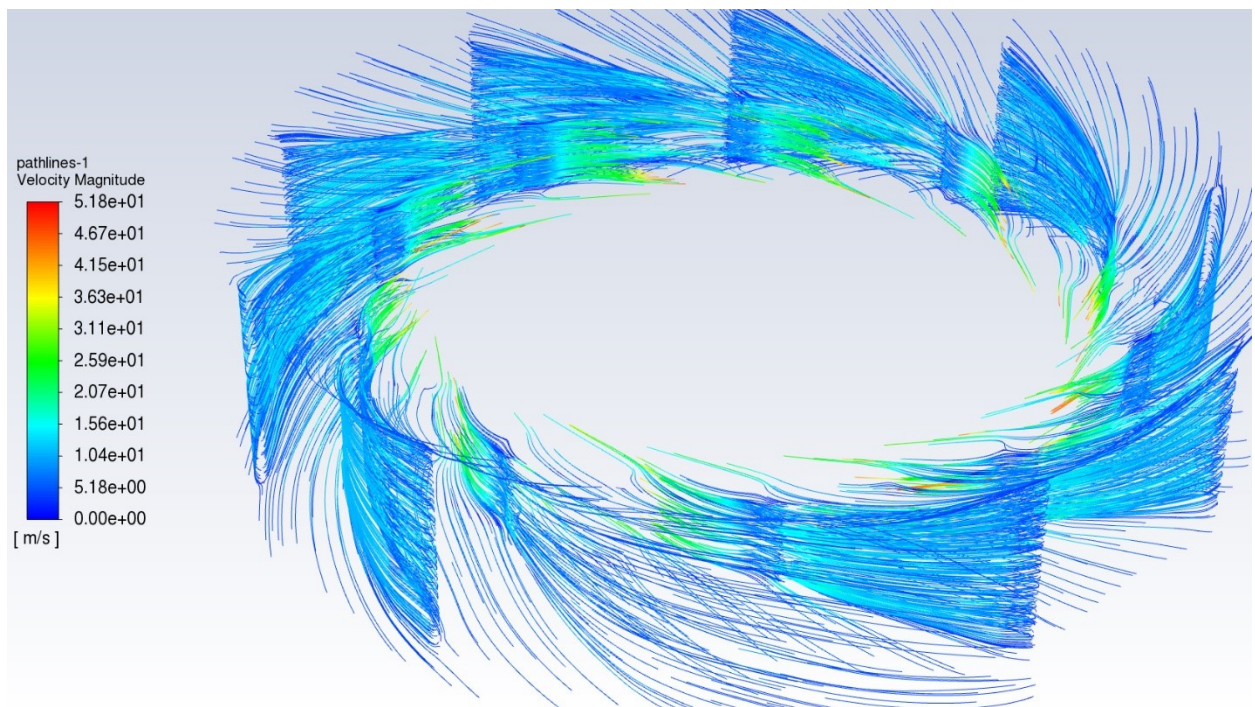


Slika 6-40 Strujnice brzine oko privodećih lopatica

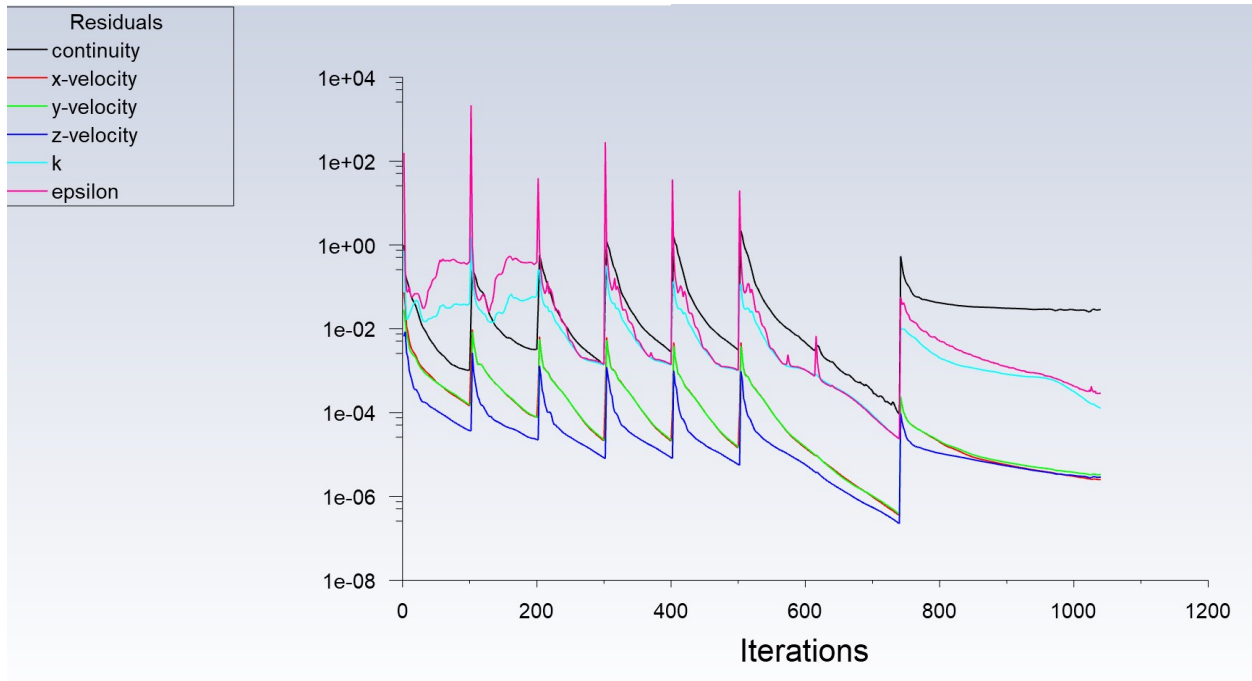




*Slika 6-41 Strujnice brzine na domeni spirale*



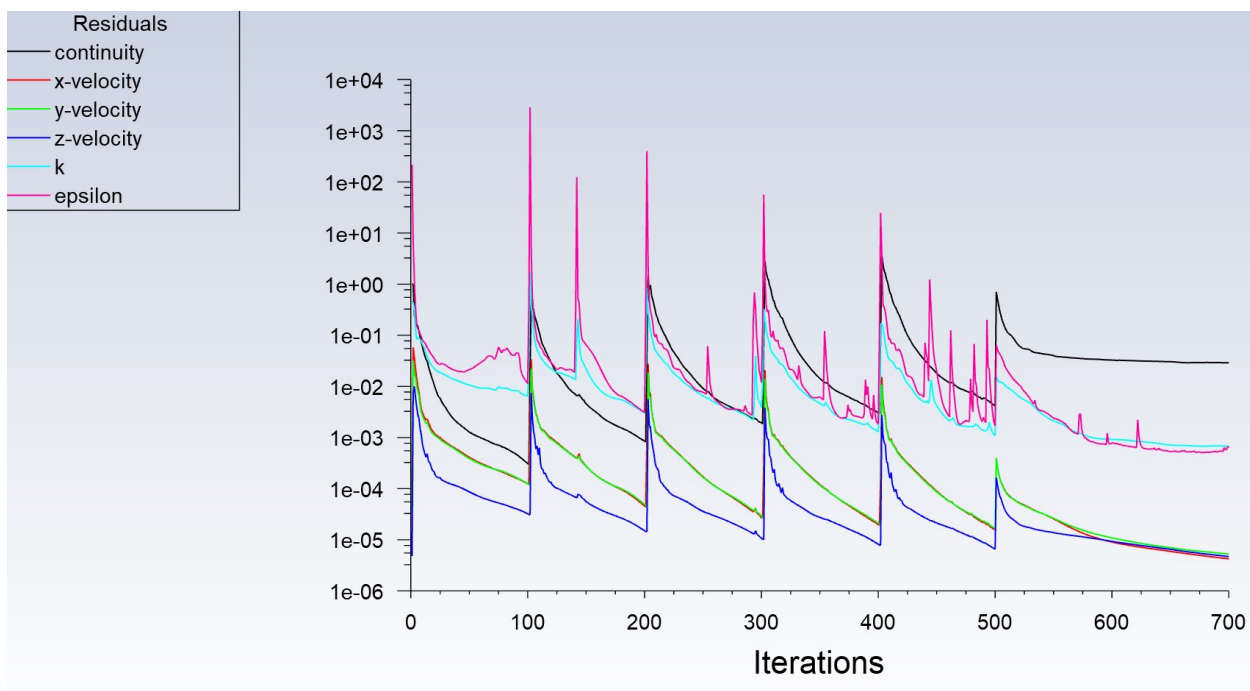
*Slika 6-42 Strujnice brzine na domeni predprivodećih lopatica*



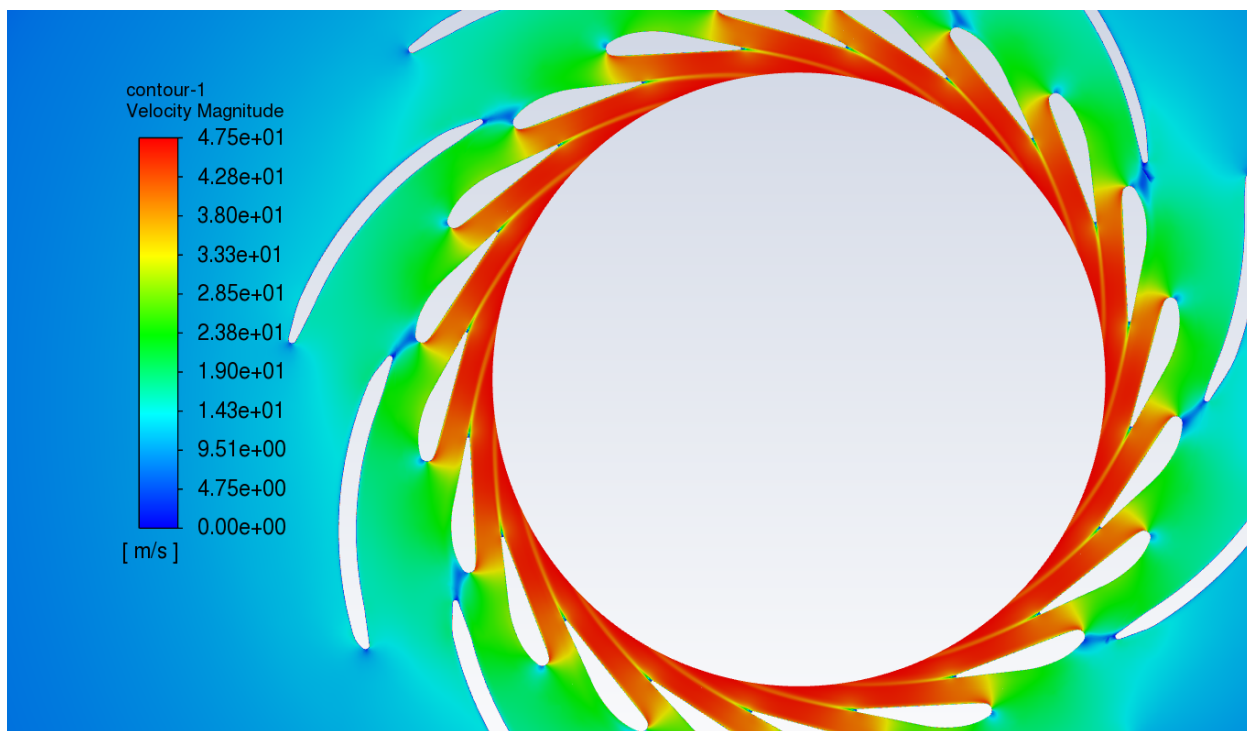
*Slika 6-43 Reziduali numeričke analize*



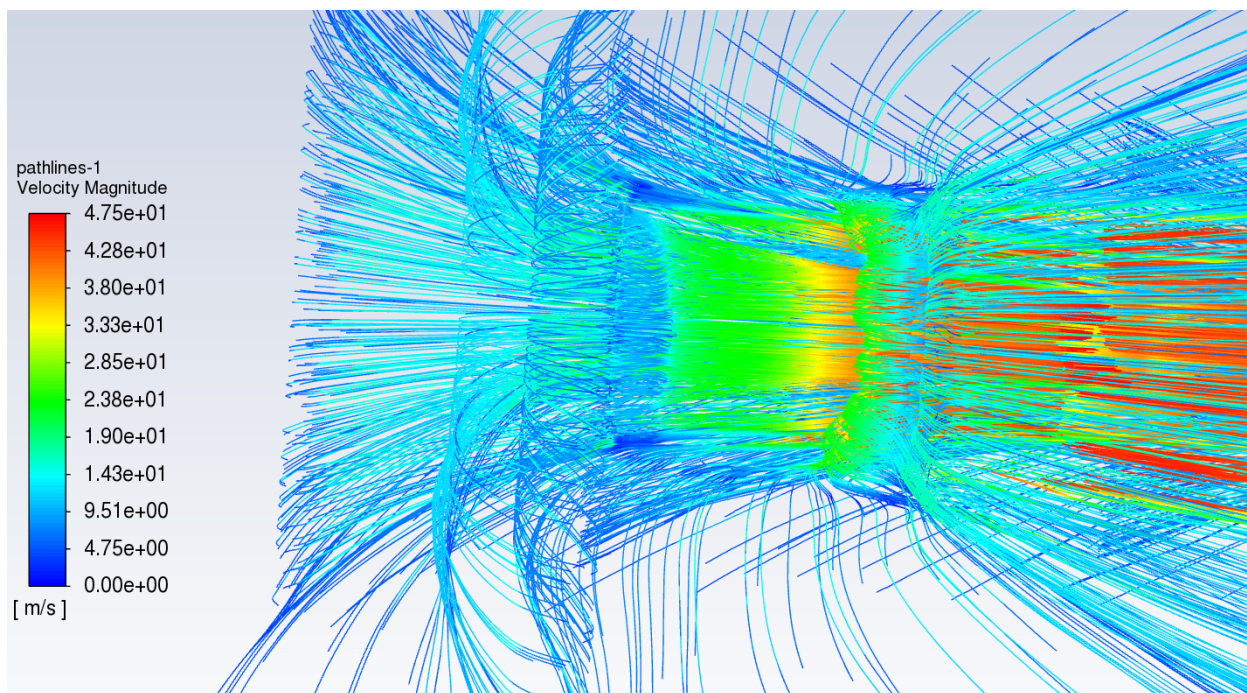
## 6.6 Vizualizacija rezultata za položaj privodećih lopatica od 14°



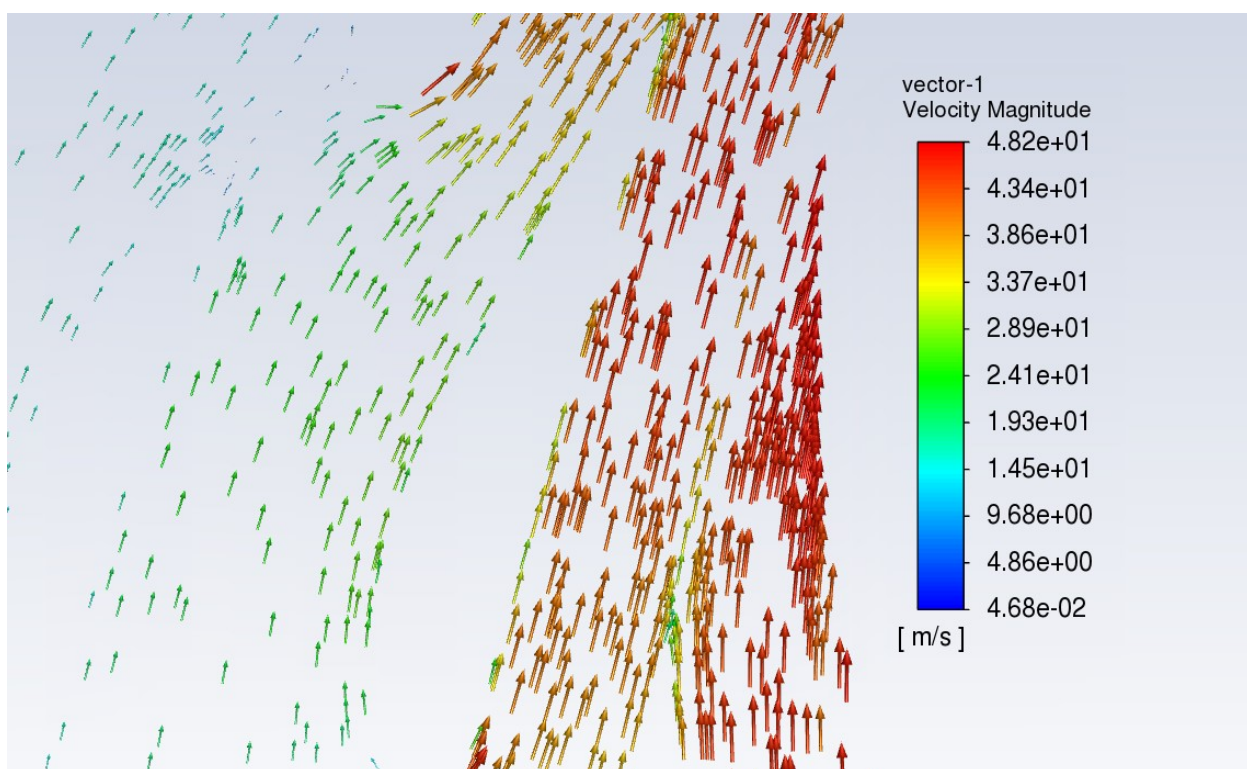
Slika 6-44 Reziduali numeričke analize



Slika 6-45 Konture magnitude brzine u iso ravnini



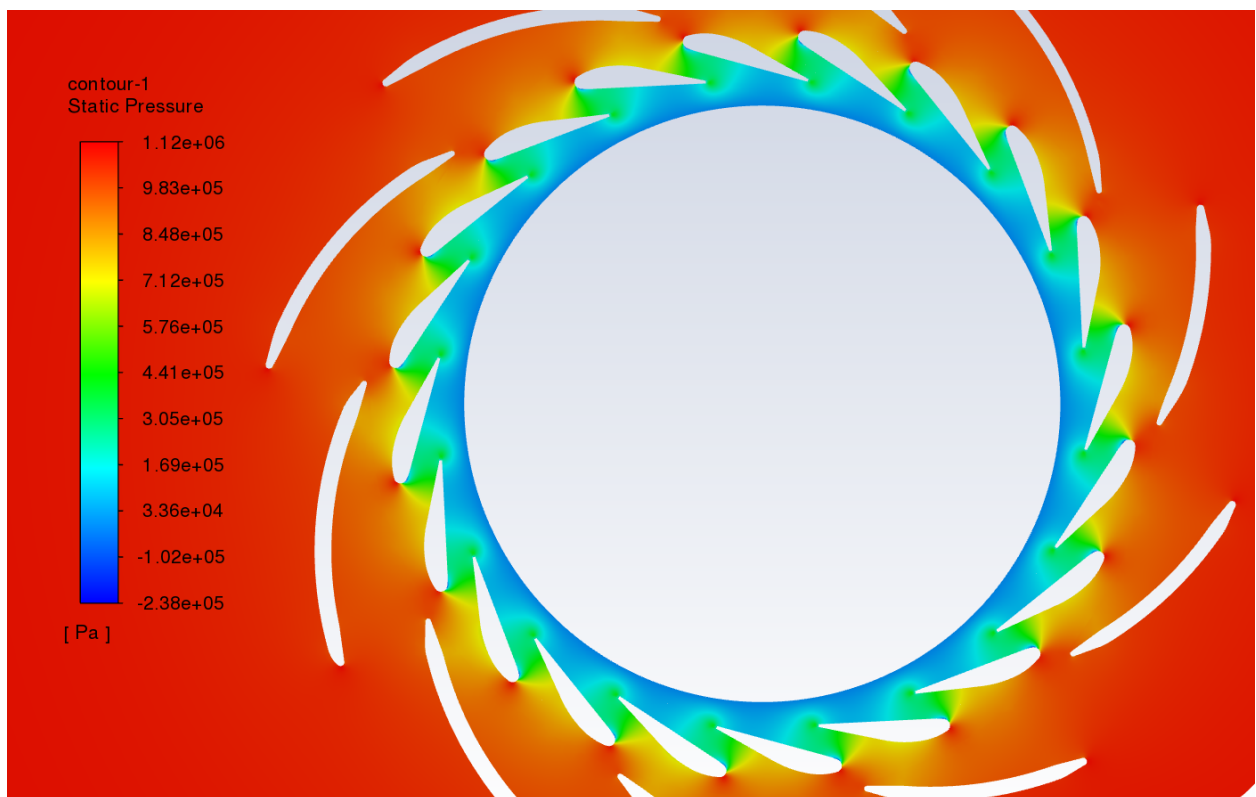
*Slika 6-46 Strujnice brzine na ulasku u privodeće kolo*



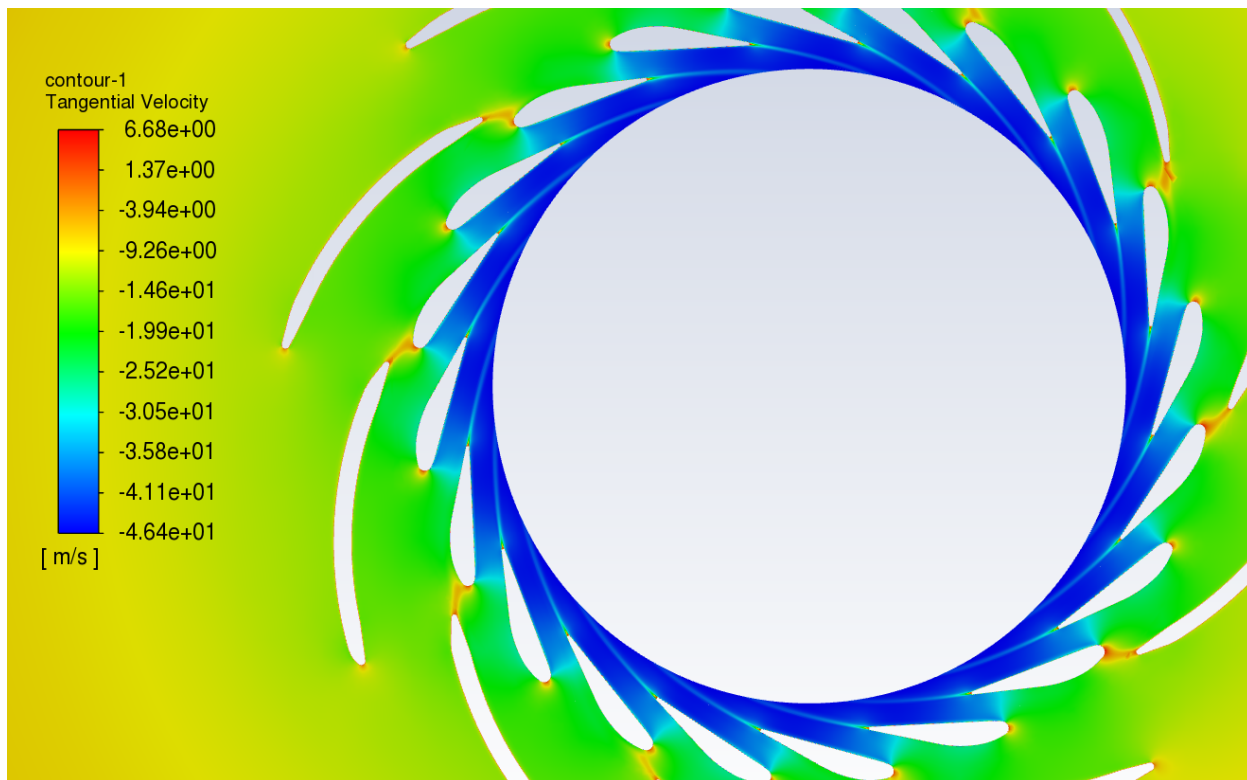
*Slika 6-47 Vektori brzine oko privodećih lopatica*



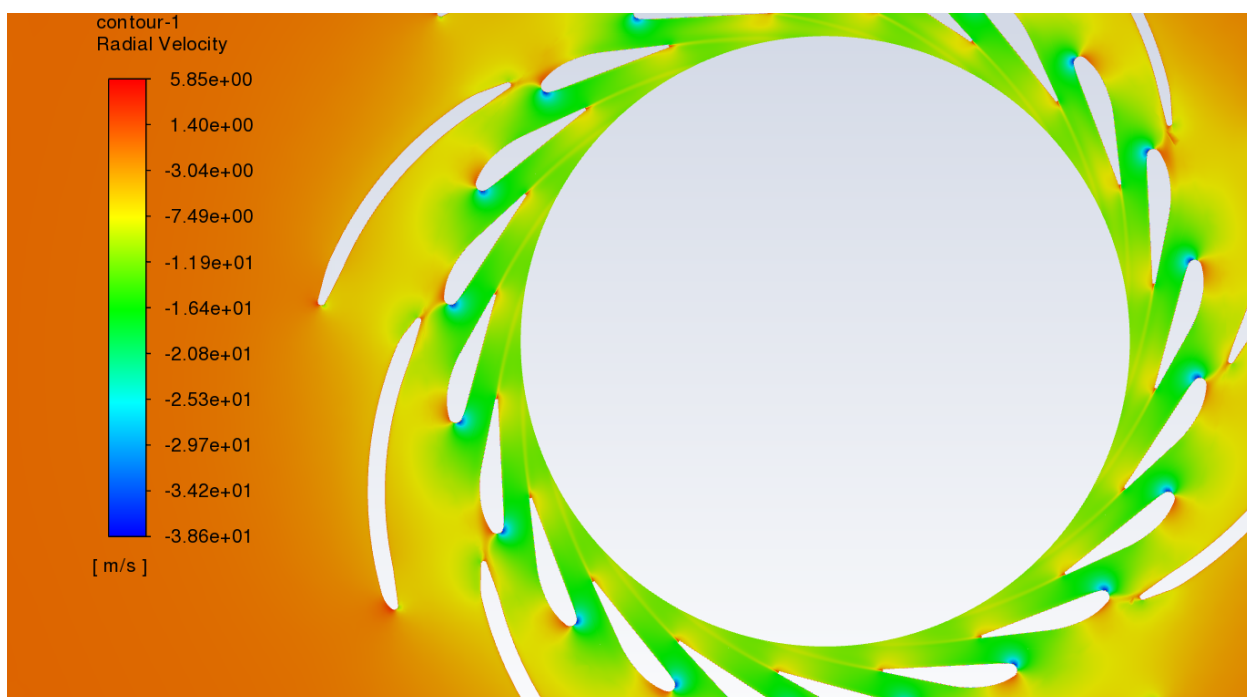
*Slika 6-48 Konture totalnog tlaka u iso ravnini*



*Slika 6-49 Konture statičkog tlaka u iso ravnini*

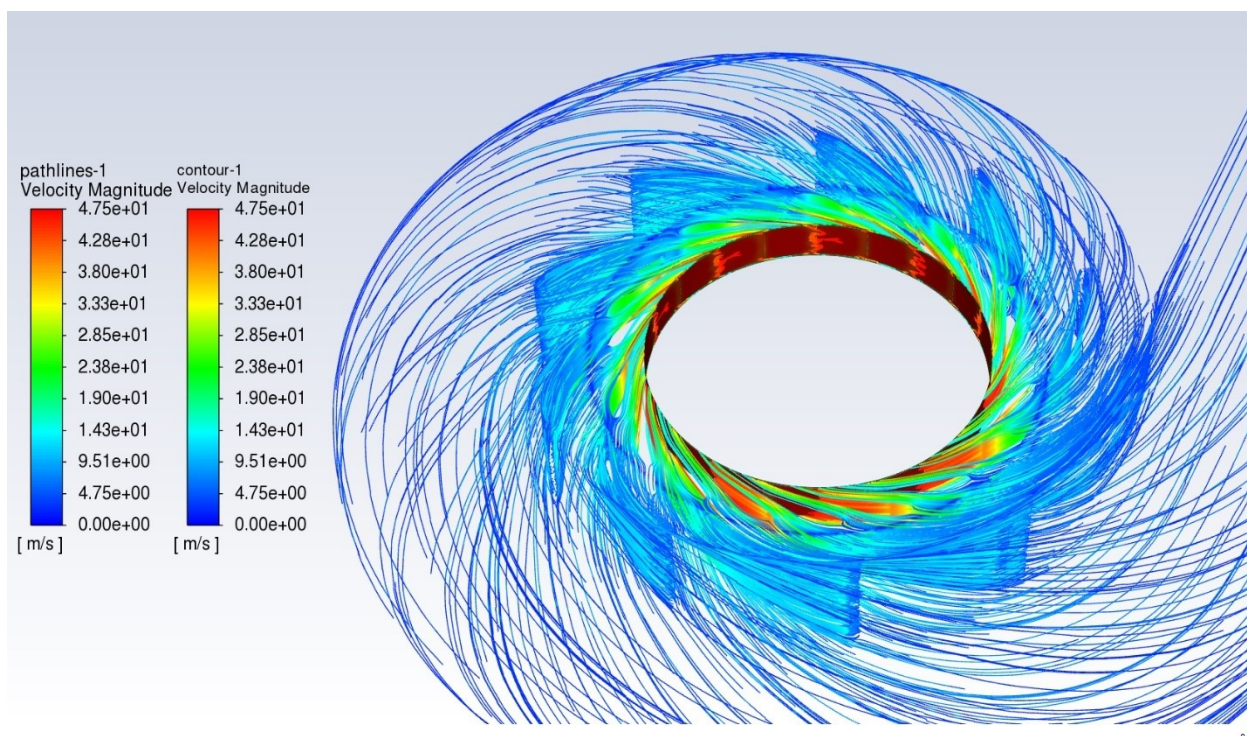


*Slika 6-50 Konture tangencijalne brzine u iso ravnini*



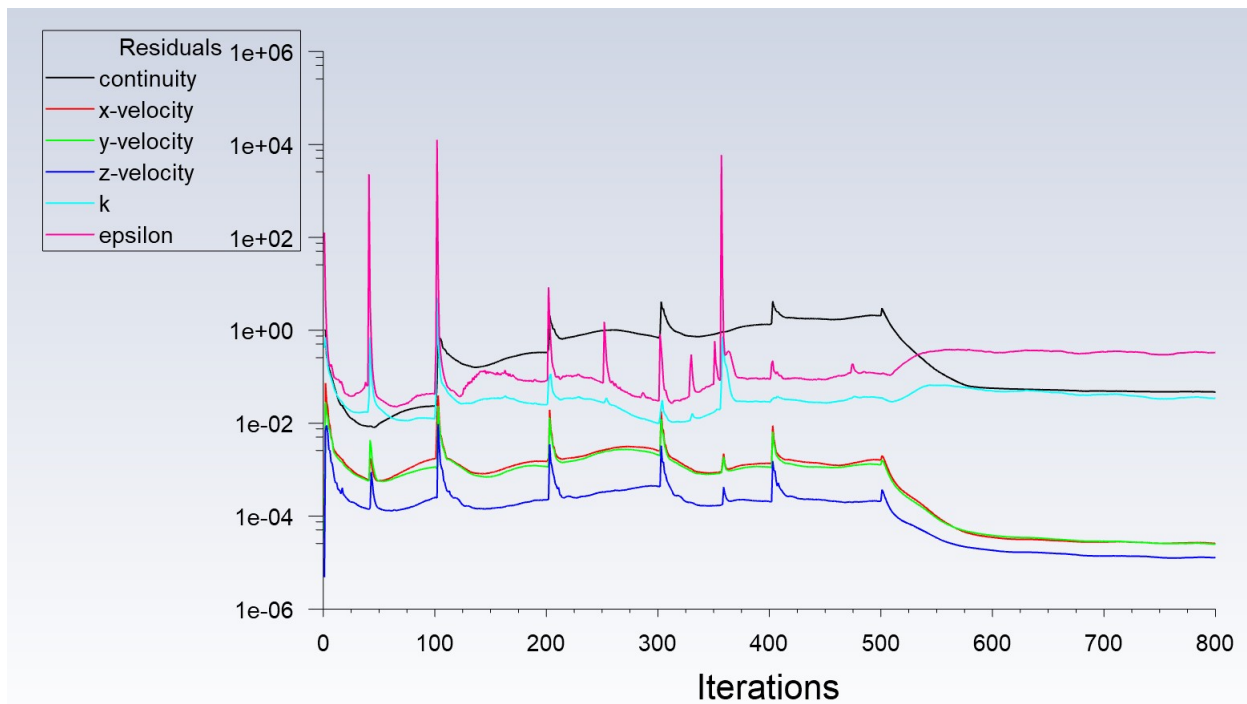
*Slika 6-51 Konture radijalne brzine u iso ravnini*



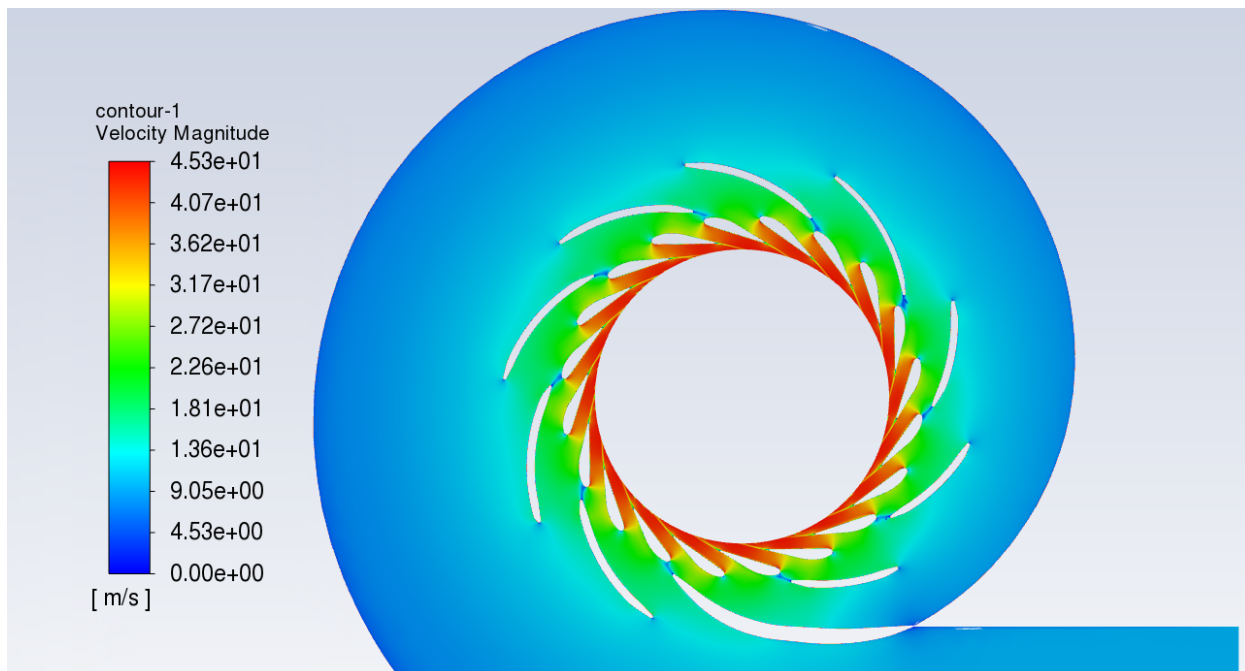


*Slika 6-52 Strujnice brzine na domeni predprivodećih lopatica i spirali*

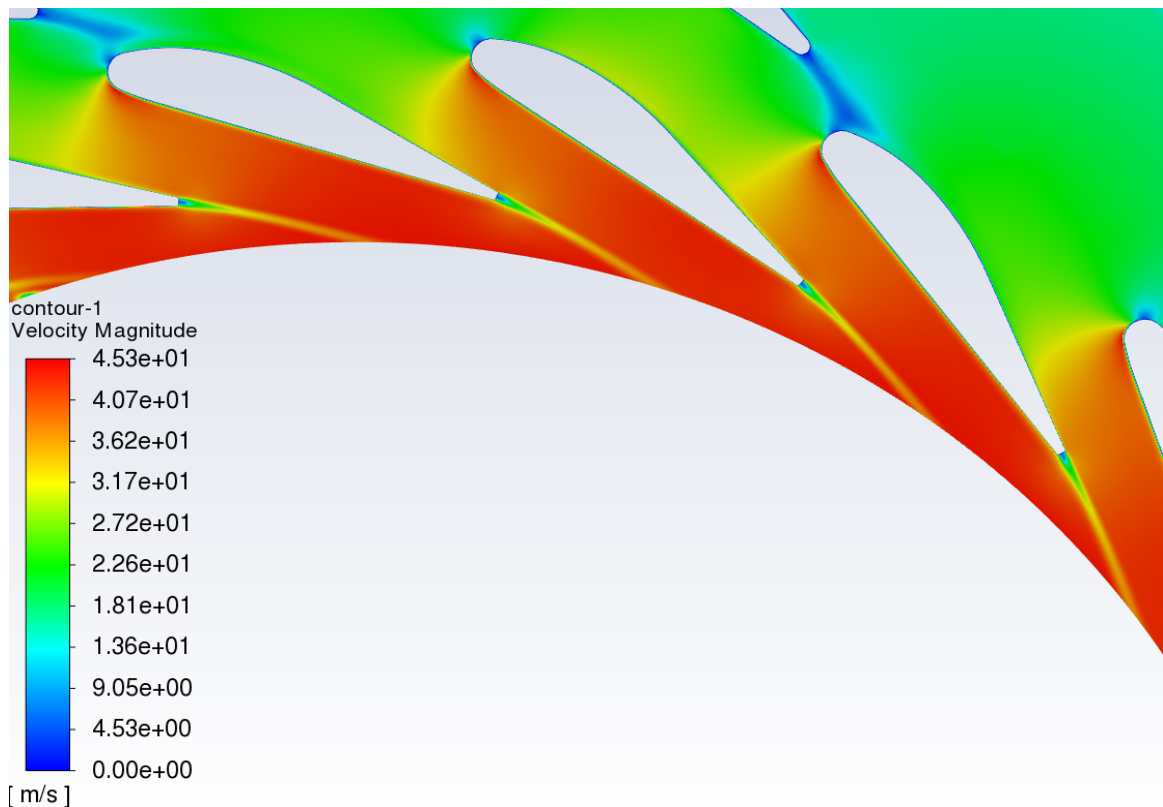
## 6.7 Vizualizacija rezultata za položaj privodećih lopatica od 16°



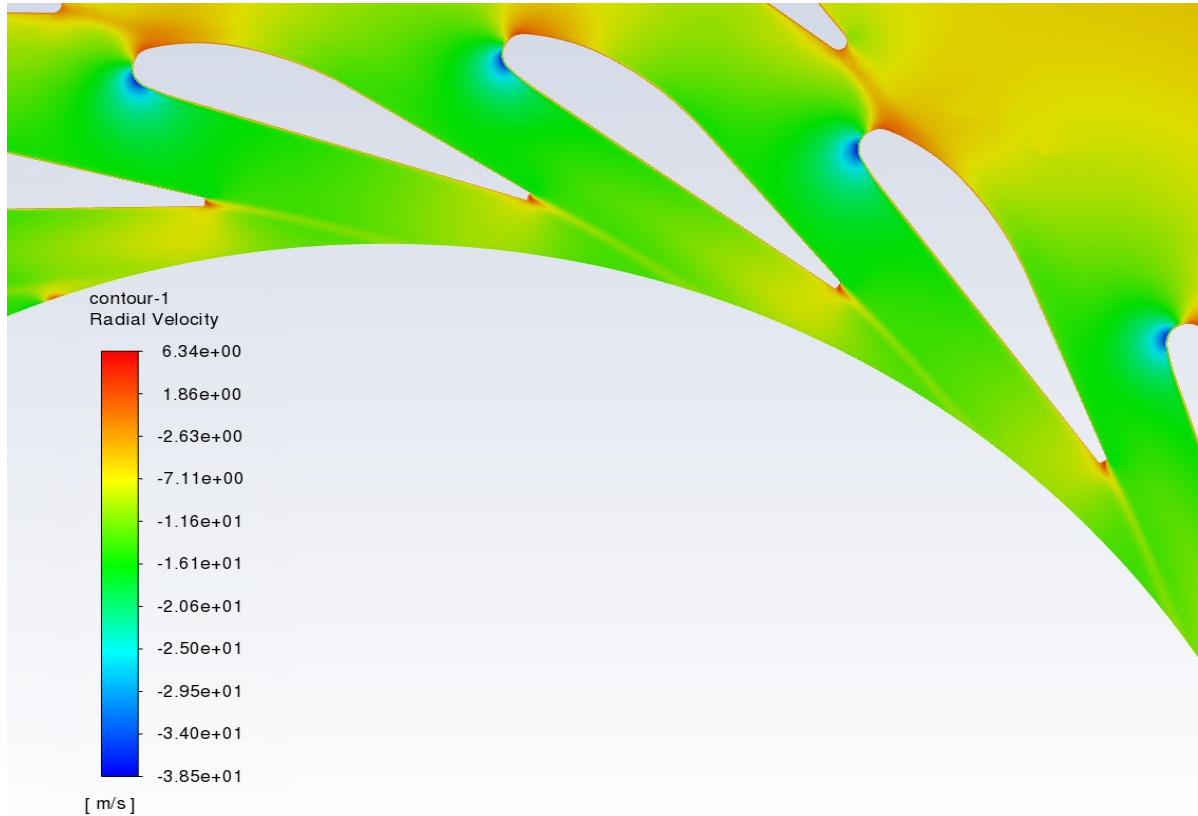
Slika 6-53 Reziduali numeričke analize



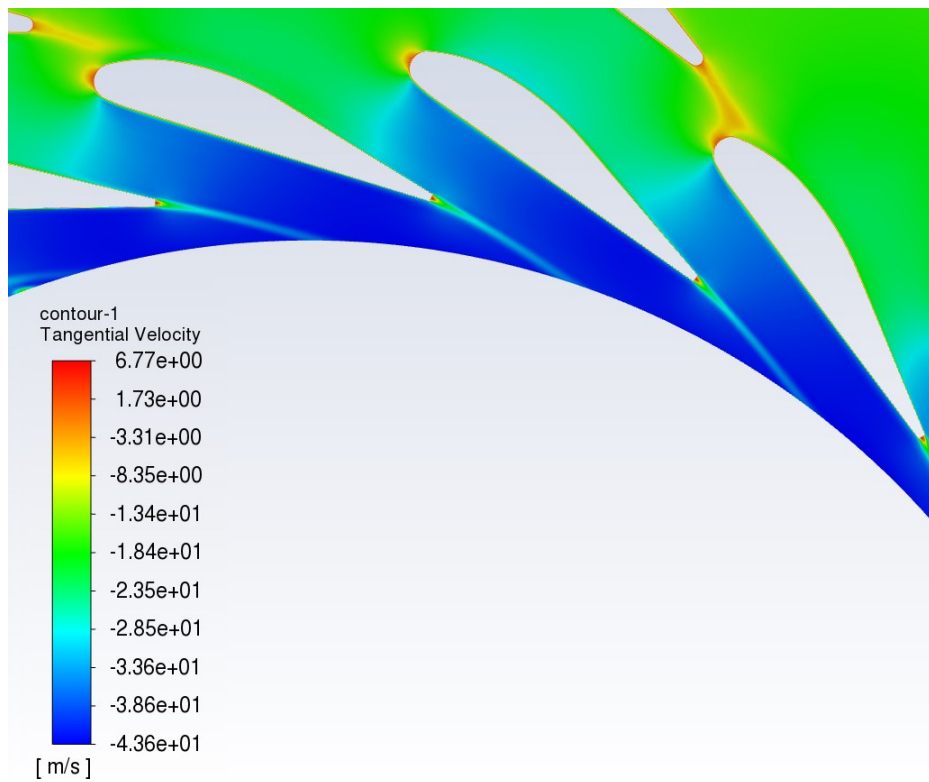
Slika 6-54 Konture magnitude brzine u iso ravnini



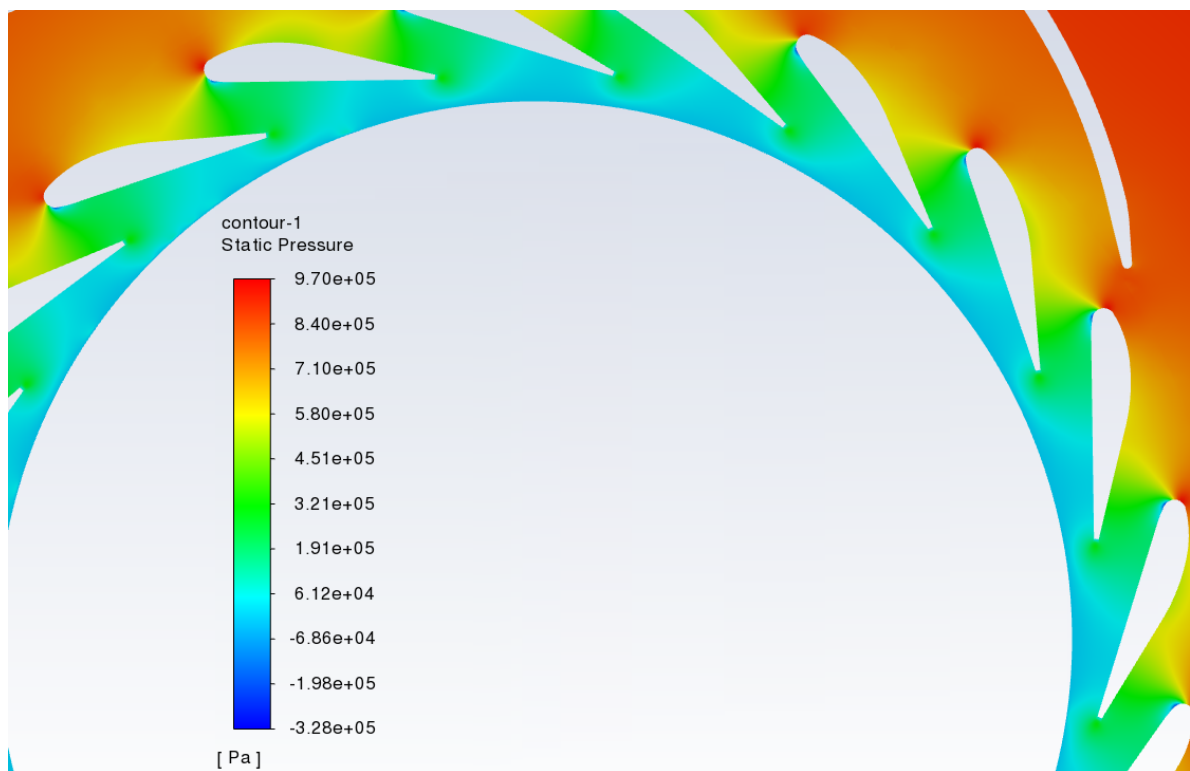
*Slika 6-55 Konture magnitude brzine u iso ravnini – detalj*



*Slika 6-56 Konture radijalne brzine u iso ravnini*

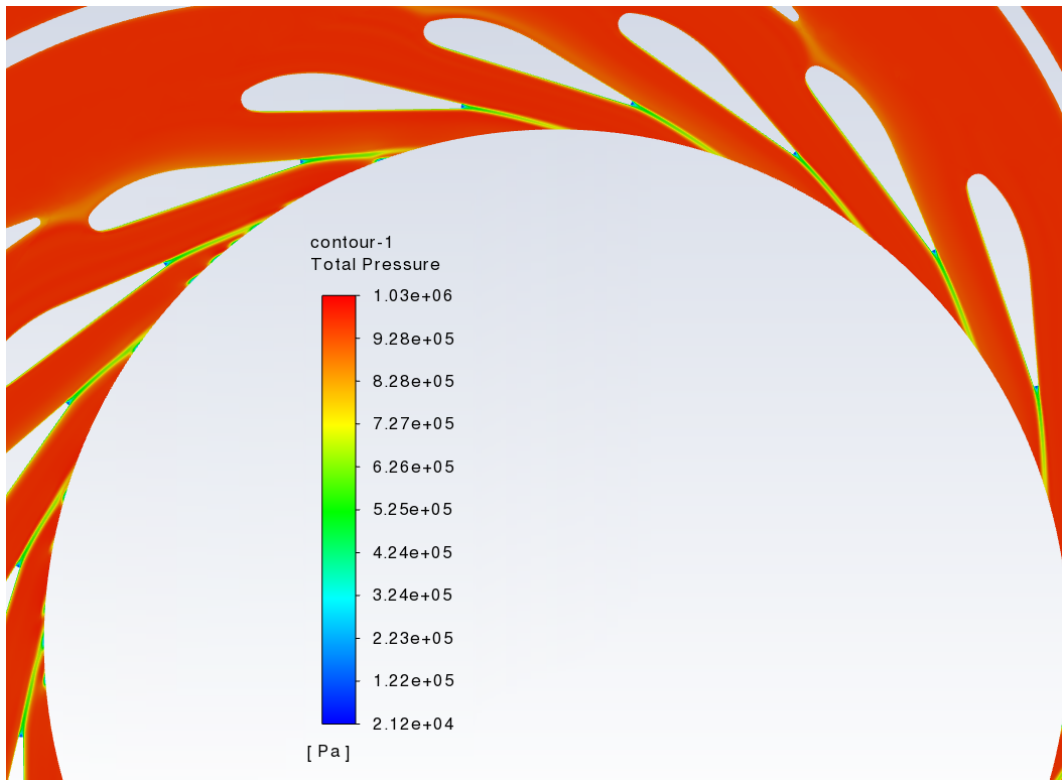


*Slika 6-57 Konture tangencijalne brzine u iso ravnini*

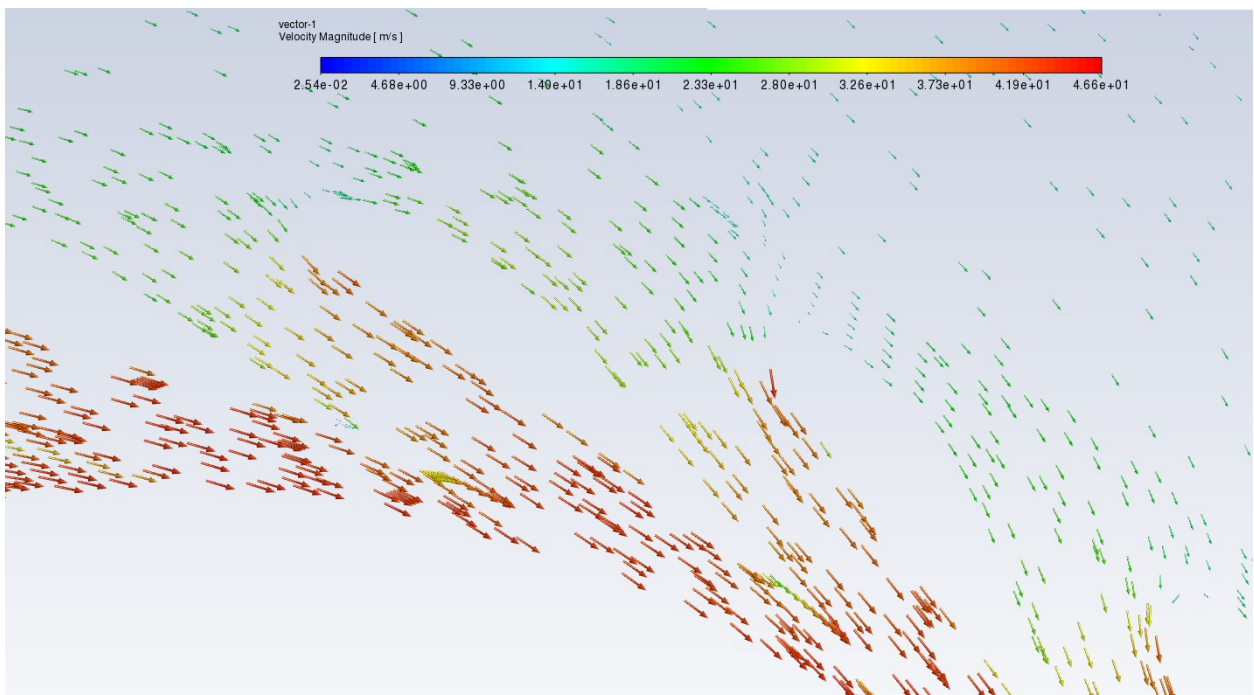


*Slika 6-58 Konture statičkog tlaka u iso ravnini*

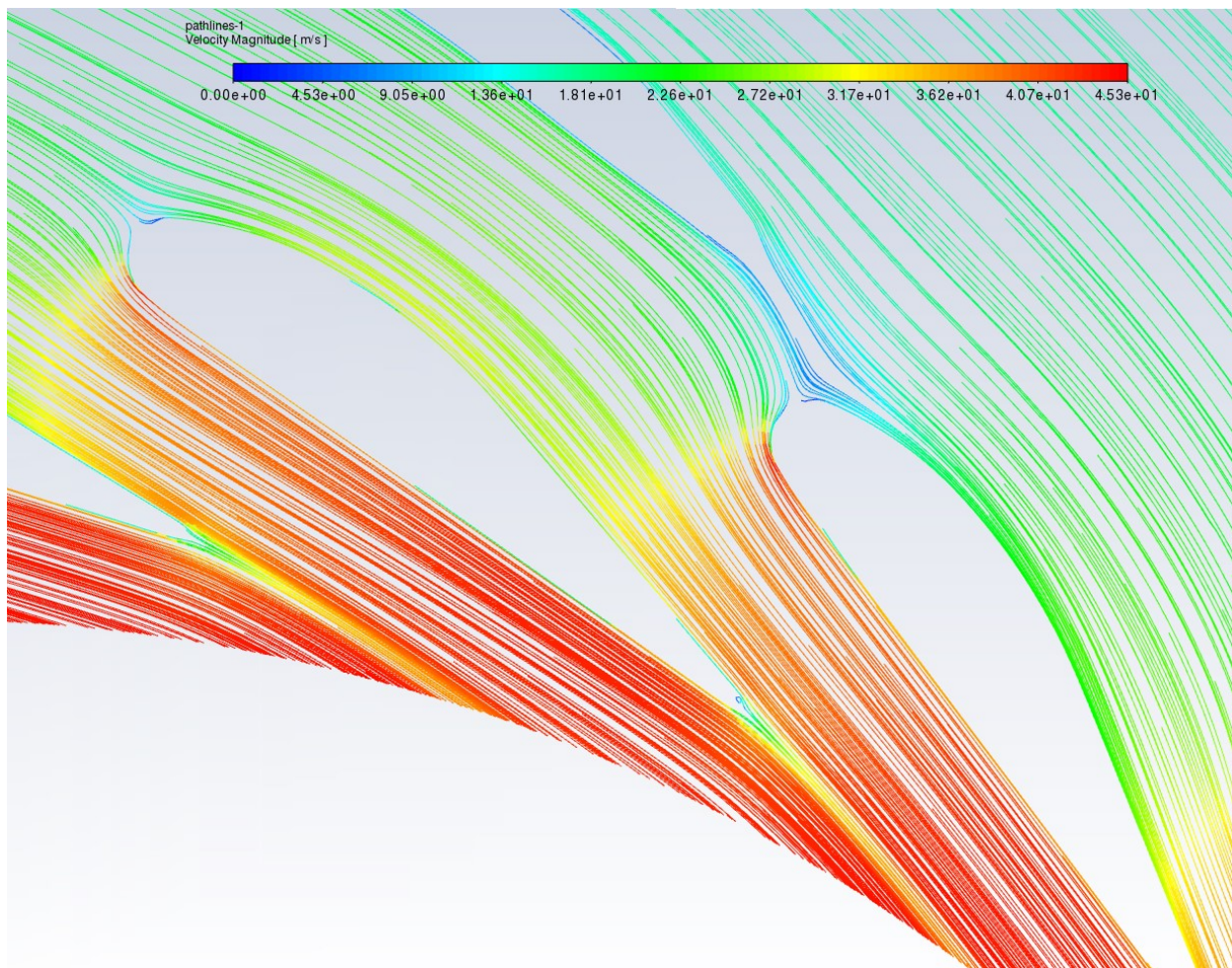




*Slika 6-59 Konture totalnog tlaka u iso ravnini*

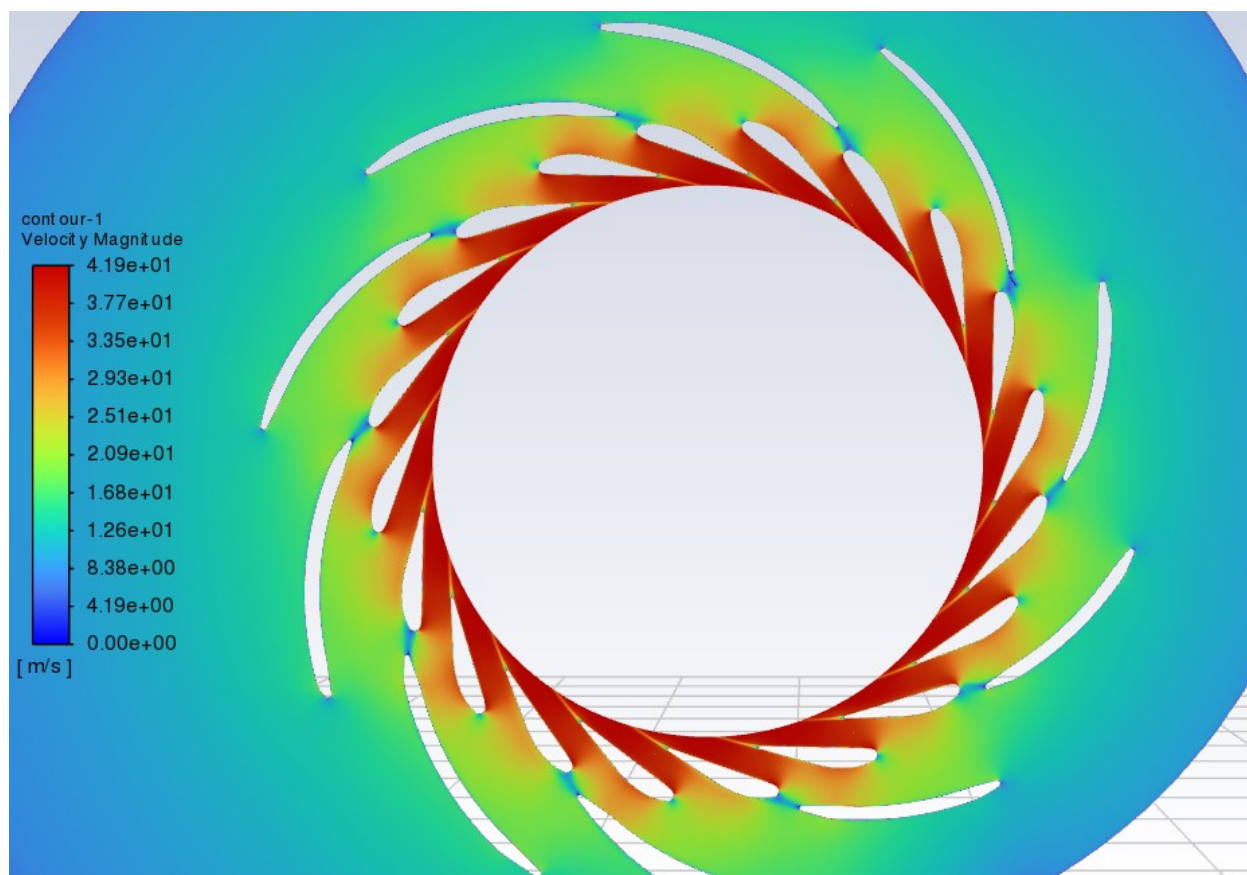


*Slika 6-60 Vektori brzine oko privodećih lopatica*



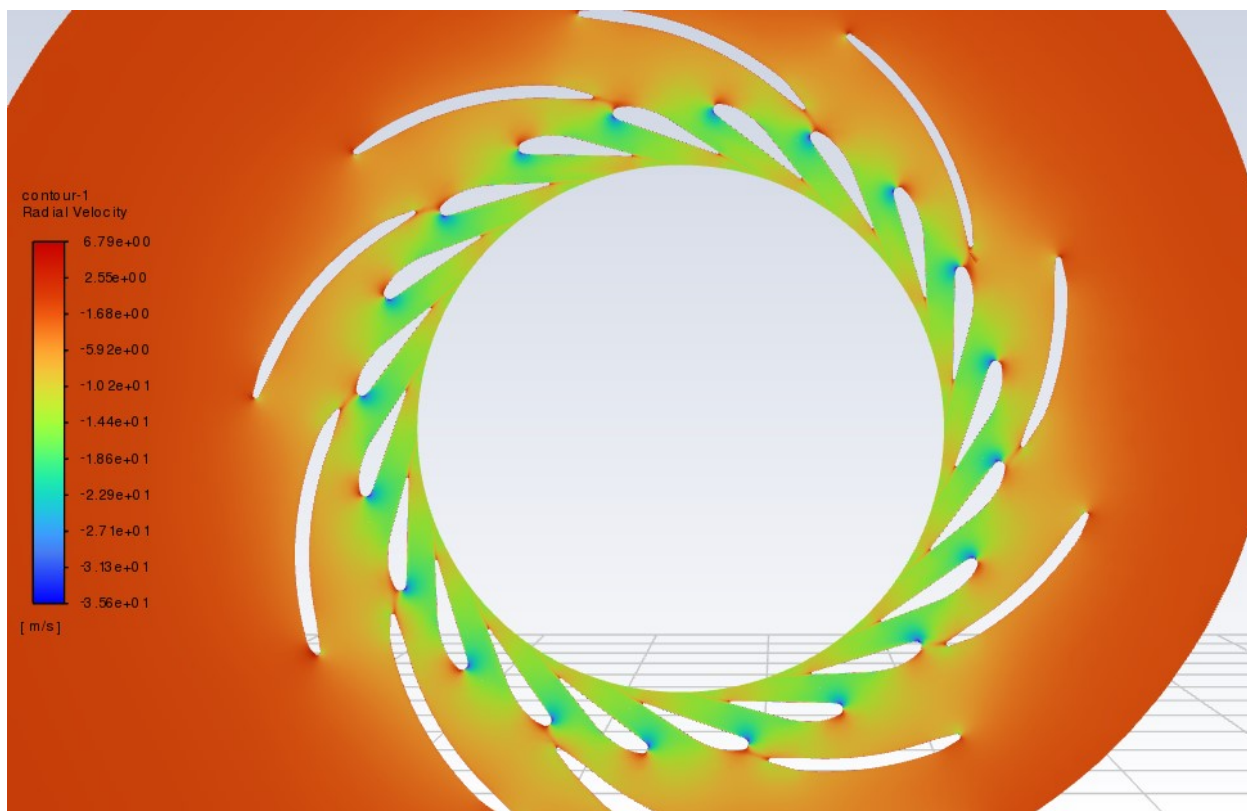
*Slika 6-61 Strujnice brzine oko privodećih lopatica*

## 6.8 Vizualizacija rezultata za položaj privodećih lopatica od 18°

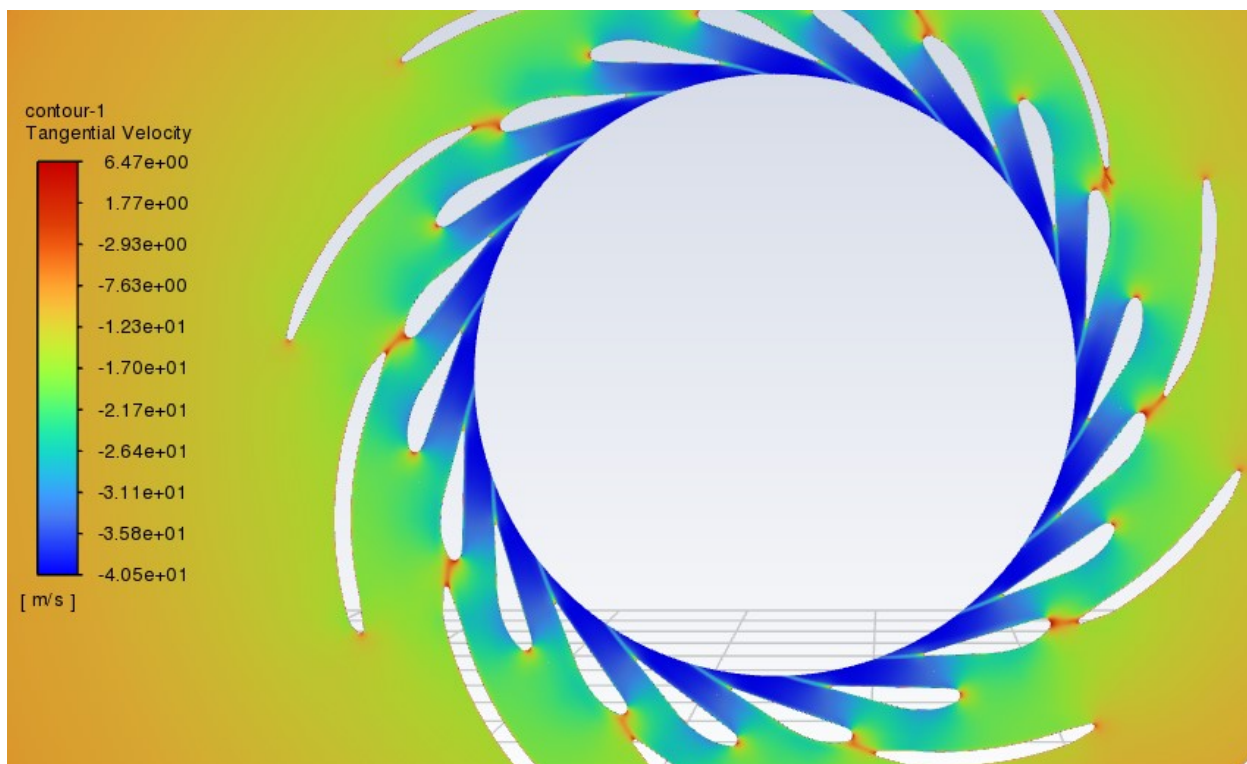


*Slika 6-62 Konture magnitude brzine u iso ravnini*

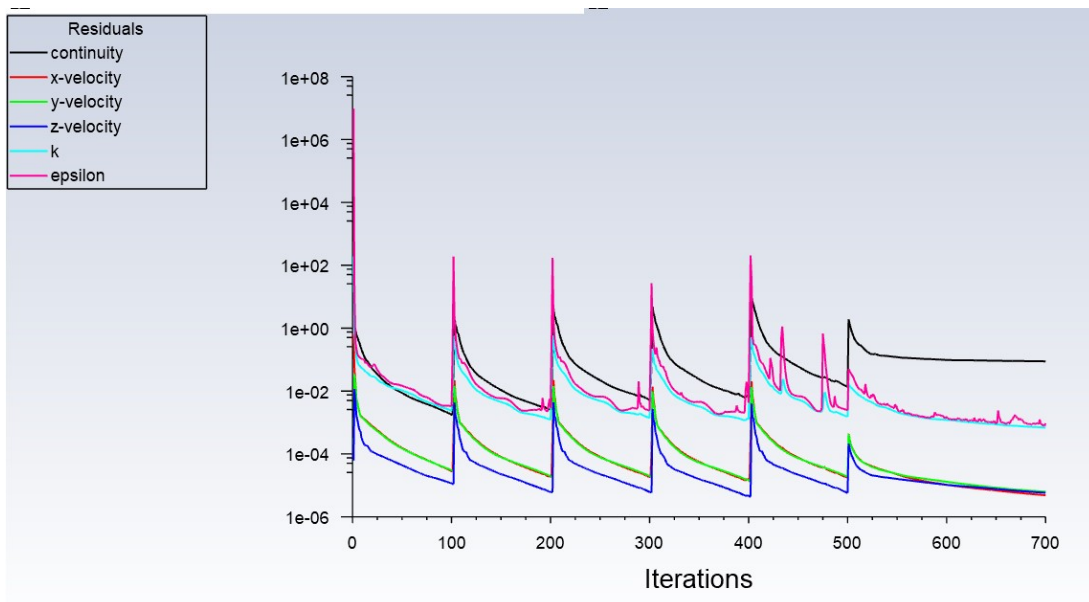




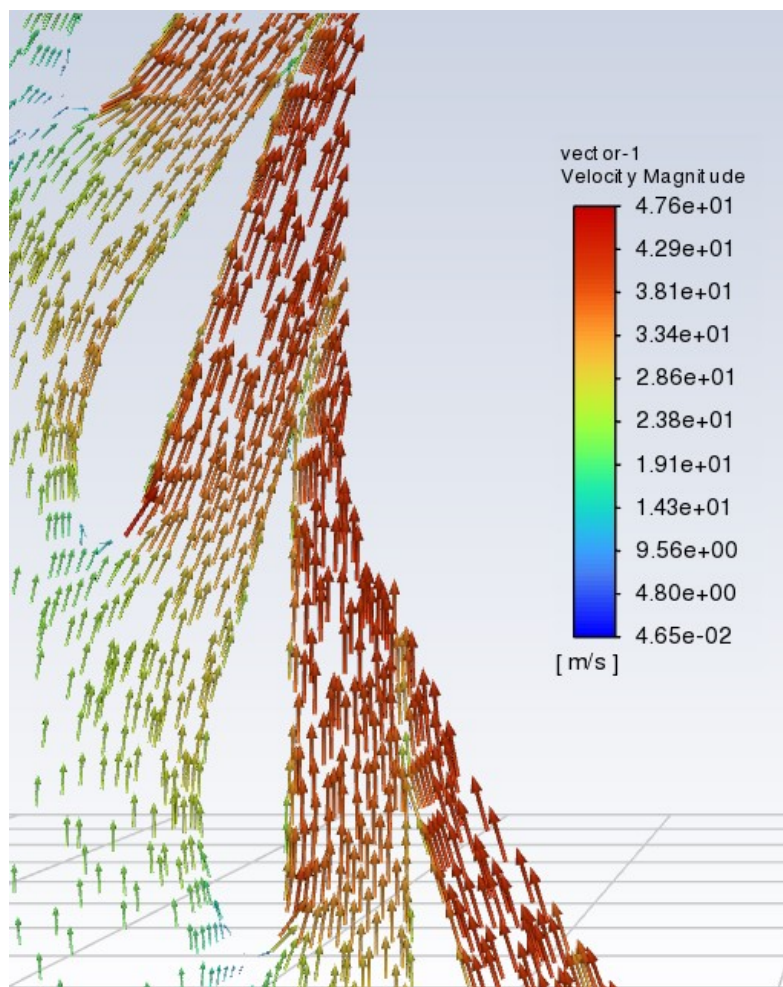
*Slika 6-63 Konture radijalne brzine u iso ravnini*



*Slika 6-64 Konture tangencijalne brzine u iso ravnini*

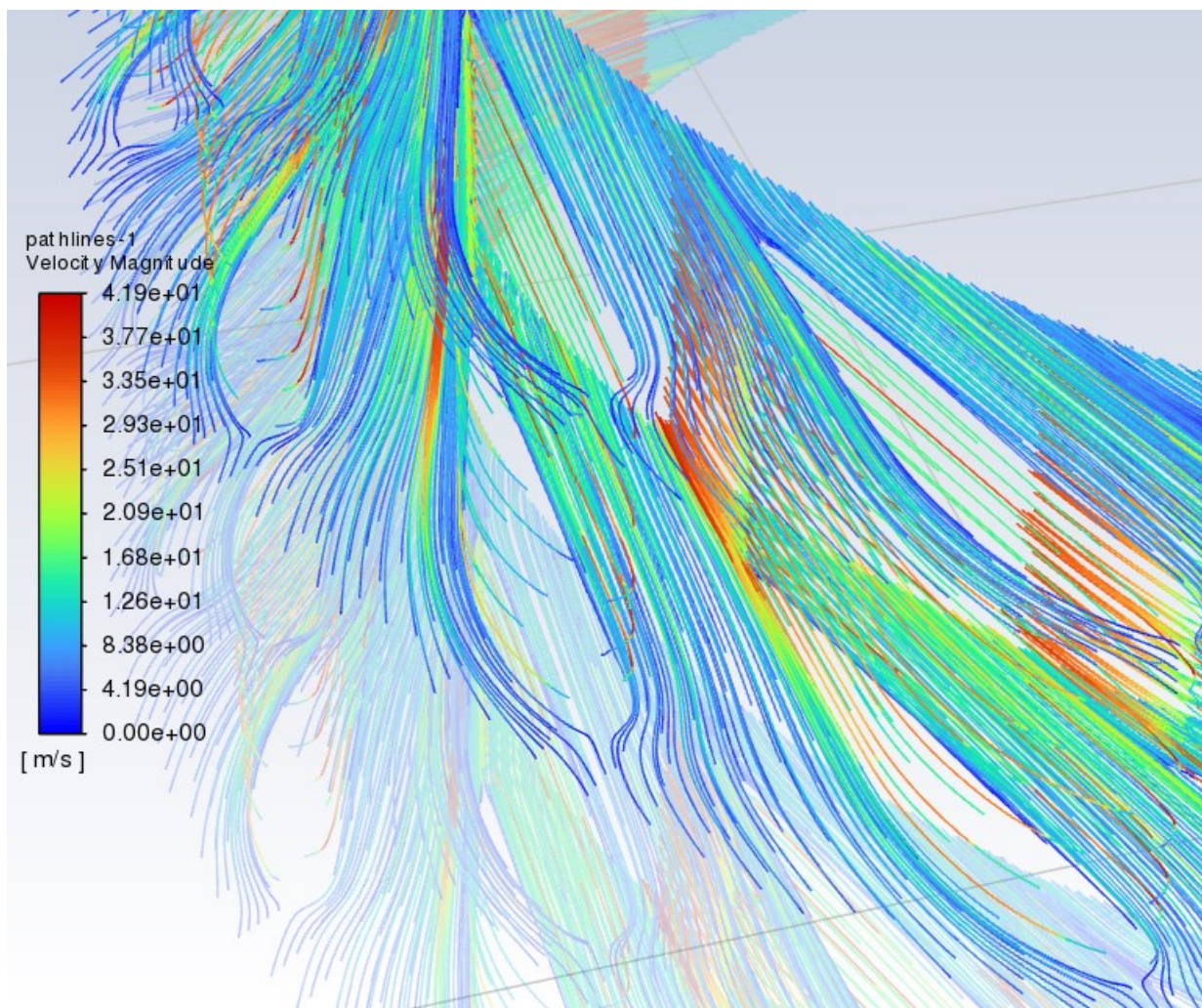


Slika 6-65 Reziduali numeričke analize



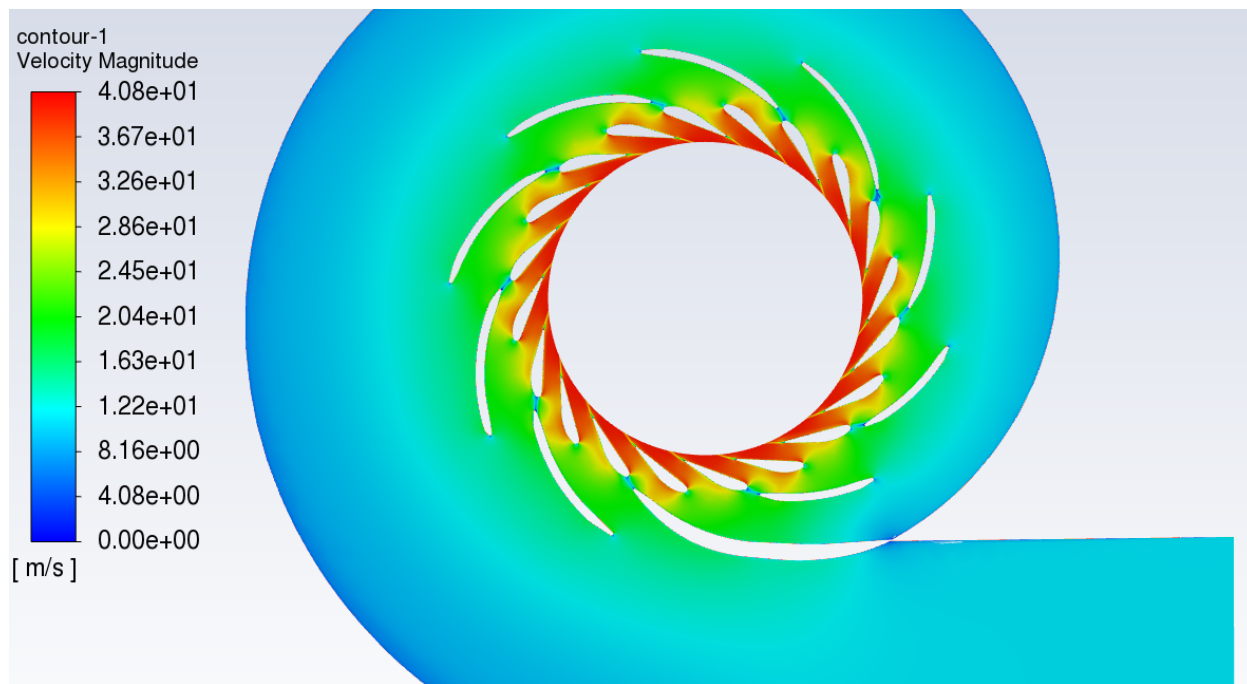
Slika 6-66 Vektori brzine oko privodećih lopatica



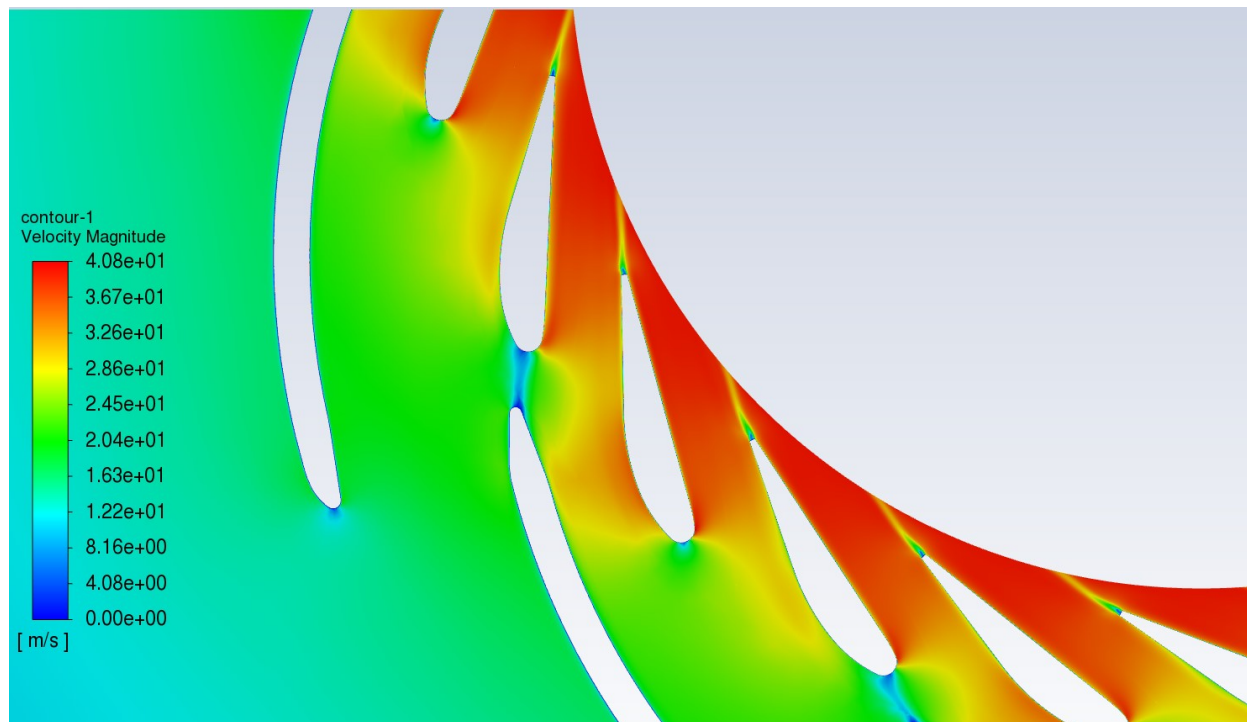


*Slika 6-67 Strujnice brzine oko privodećih lopatica*

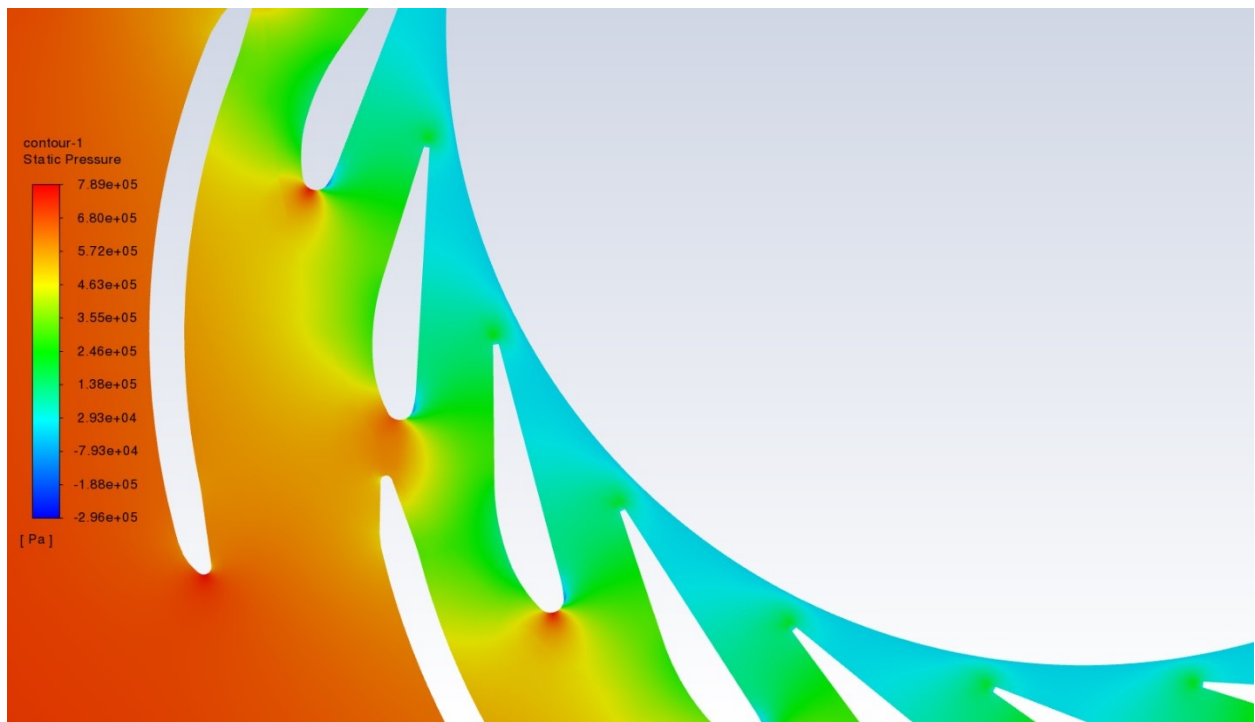
## 6.9 Vizualizacija rezultata za položaj privodećih lopatica od 20°



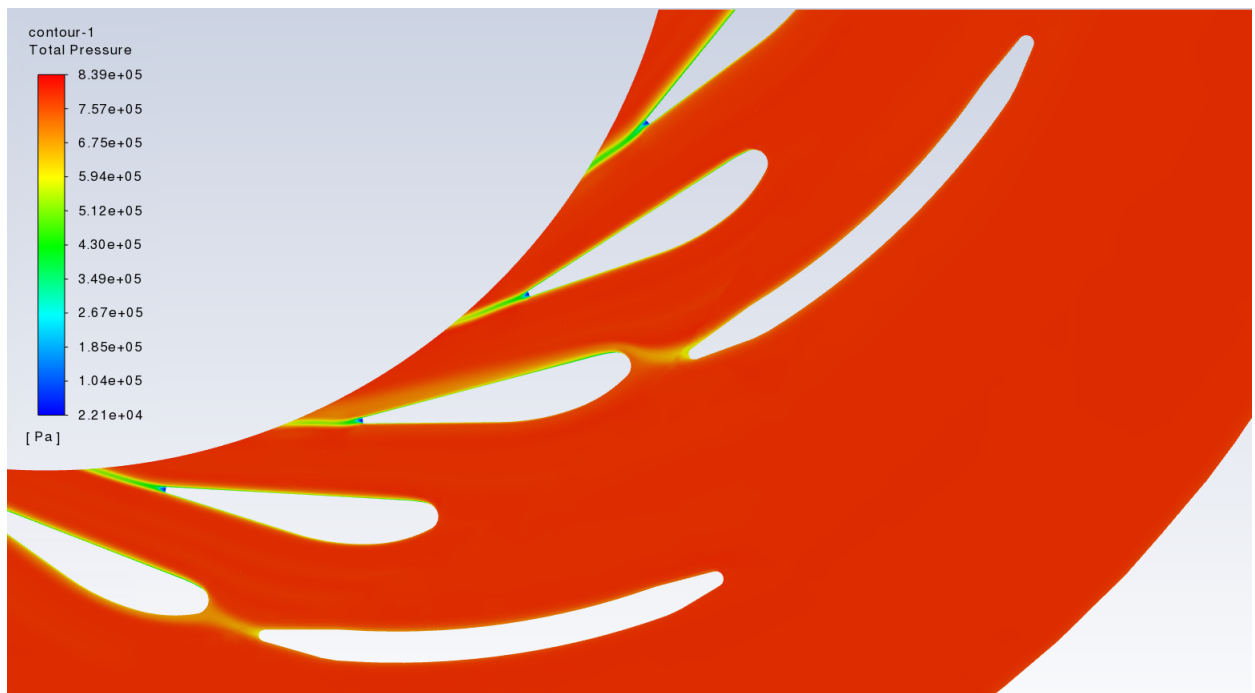
Slika 6-68 Konture magnitude brzine u iso ravnini



Slika 6-69 Konture magnitude brzine u iso ravnini - detalj



*Slika 6-70 Konture statičkog tlaka u iso ravnini*

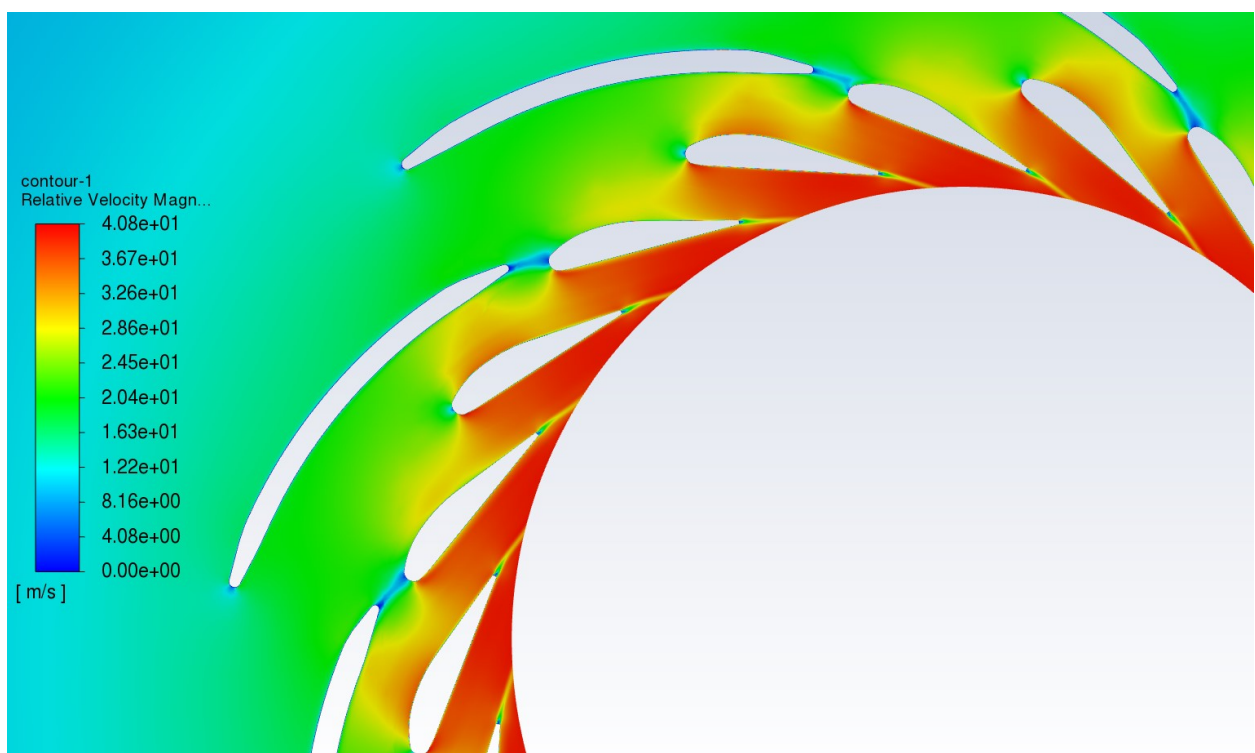


*Slika 6-71 Konture totalnog tlaka u iso ravnini*

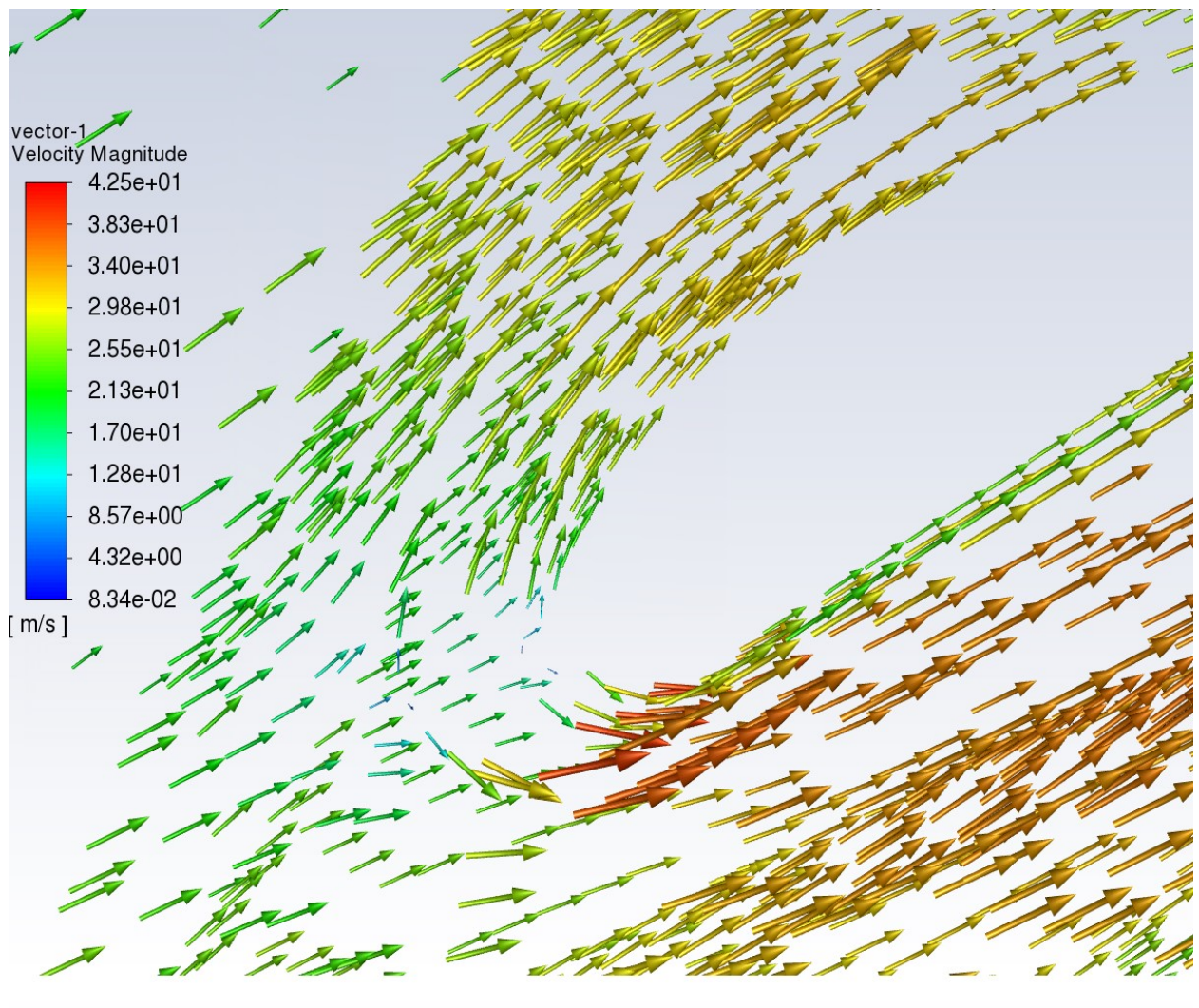




Slika 6-72 Konture tangencijalne brzine u iso ravnini

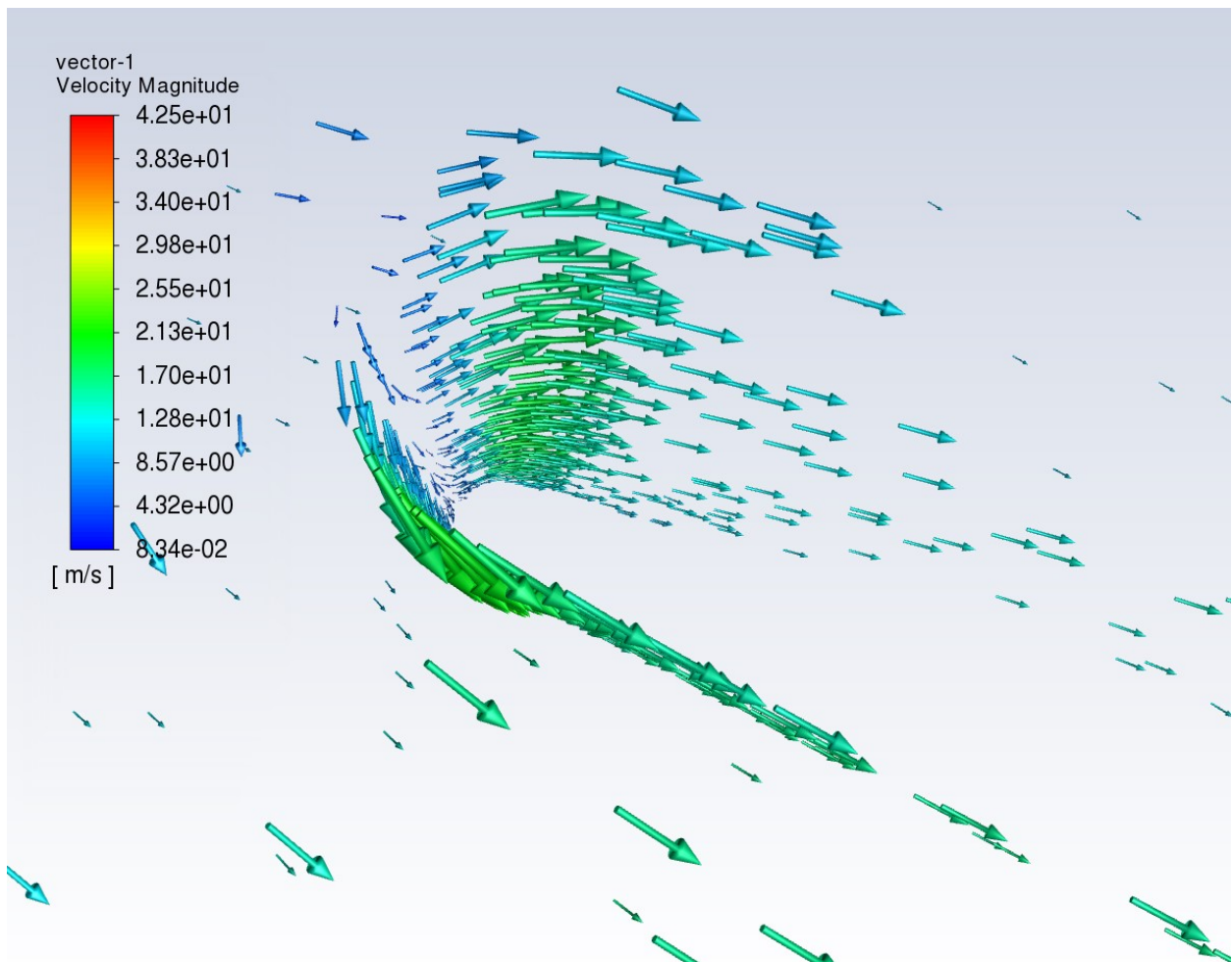


Slika 6-73 Konture relativne brzine u iso ravnini

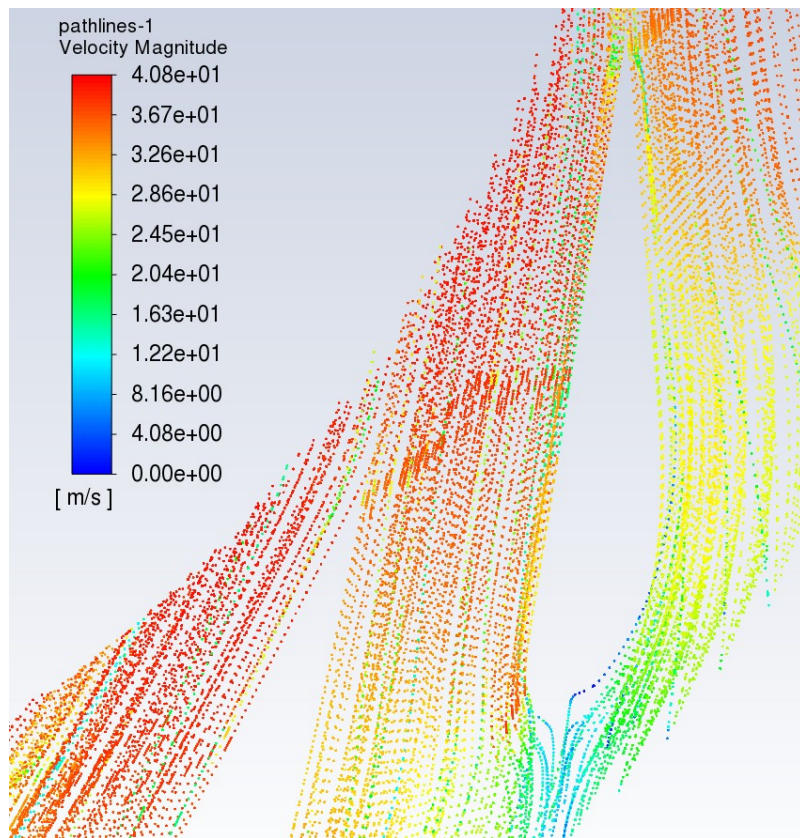


*Slika 6-74 Vektori brzine oko privodećih lopatica*

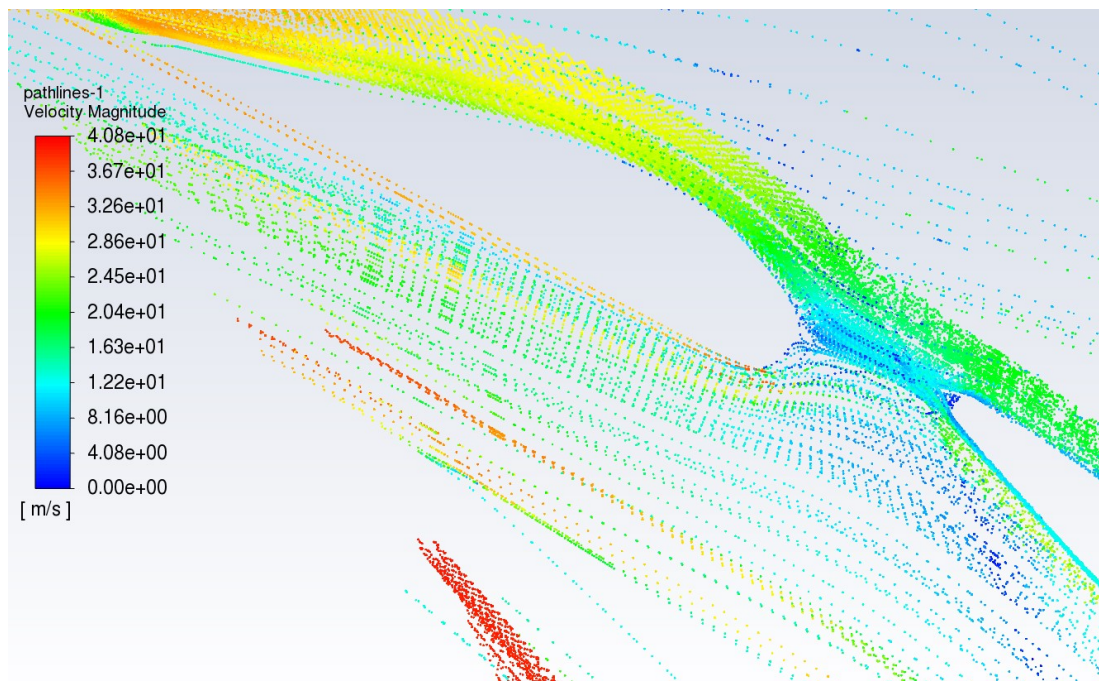




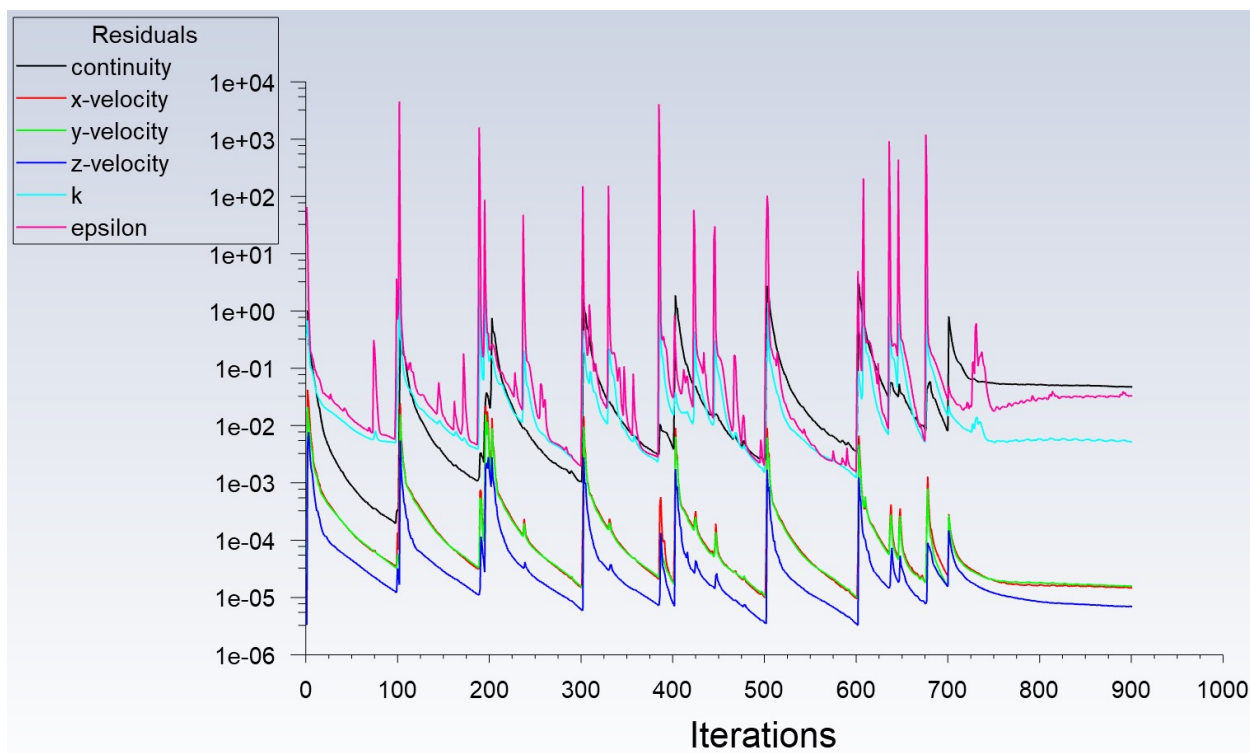
*Slika 6-75 Vektori brzine oko predprivodećih lopatica*



*Slika 6-76 Strujnice brzine oko privodećih lopatica*



*Slika 6-77 Strujnice brzine oko privodećih lopatica*



*Slika 6-78 Reziduali numeričke analize*

## 6.10 Simulacija sa fiksnim protokom

Nakon dobivenih rezultata za analize sa različitim protocima za različite kutove zakrenutosti privodeće lopatice napravljeno je 9 analiza koristeći iste postavke analize kao i za prethodne simulacije uz razliku da je protok za svaki slučaj stavljen na 45 000 kg/s. Rezultati su prikazani u slijedećem potpoglavlju.

## 6.11 Rezultati

Nakon svih numeričkih simulacija napravljeno je nekoliko grafova.

Prvi graf pokazuje ovisnost povećanja kuta zakrenutosti privodeće lopatice i pada tlaka između ulaza (inleta) i izlaza (outleta) iz domene za slučaj gdje je za svaki slučaj zakrenutosti dodijeljen specifičan maseni protok.

Drugi graf pokazuje ovisnost povećanja kuta zakrenutosti privodeće lopatice i pada tlaka između ulaza i prostora nakon predprivodećih lopatica, a prije privodećih lopatica.

Treći graf pokazuje ovisnost povećanja kuta zakrenutosti privodeće lopatice i pada tlaka između ulaza (inleta) i izlaza (outleta) iz domene za slučaj gdje je maseni protok isti za sve kuteve zakrenutosti.

Tablice 6-1 i 6-2 prikazuju rezultate dobivene pomoću opcije u FLUENT-u Reports, a pomoću nje su izračunati ukupni tlakovi na spomenutim dijelovima domene.

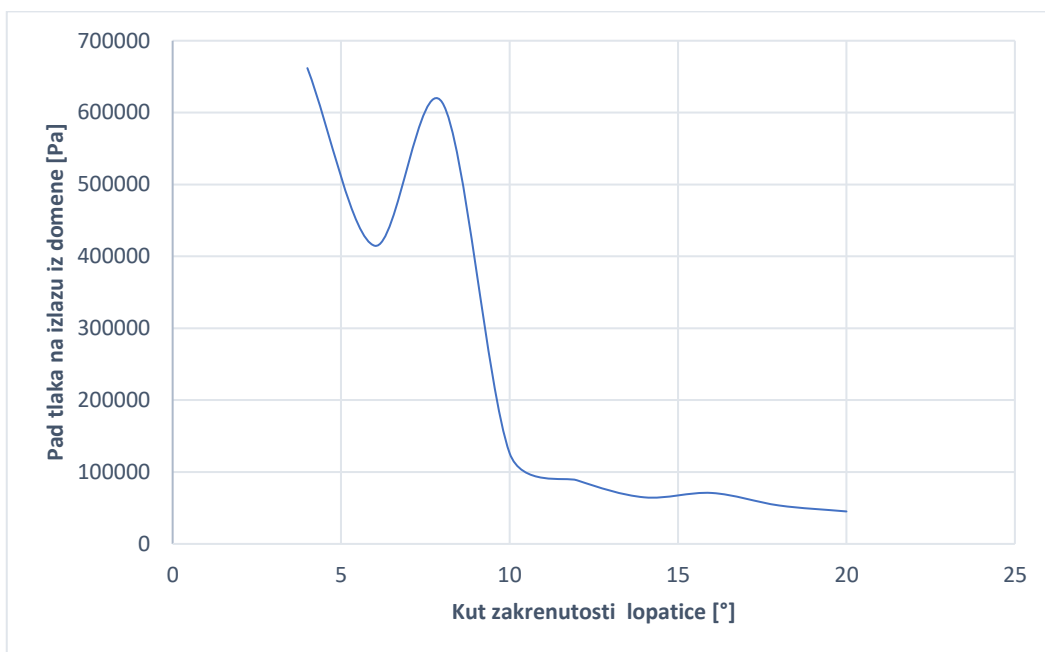
Ukupni tlak odnosi se na zbroj statičkog tlaka i dinamičkog tlaka tekućine u određenoj točki, a predstavlja ukupnu energiju tekućine u određenoj točki stanja gibanja. U mehanici fluida, prema Bernoullijevoj jednadžbi, ukupni tlak fluida u zatvorenoj cijevi je očuvan kada ne djeluje vanjska sila i kada je fluid nestlačiv.

*Tablica 6-1 Tablica rezultata tlakova na ulazu i izlazu iz domene*

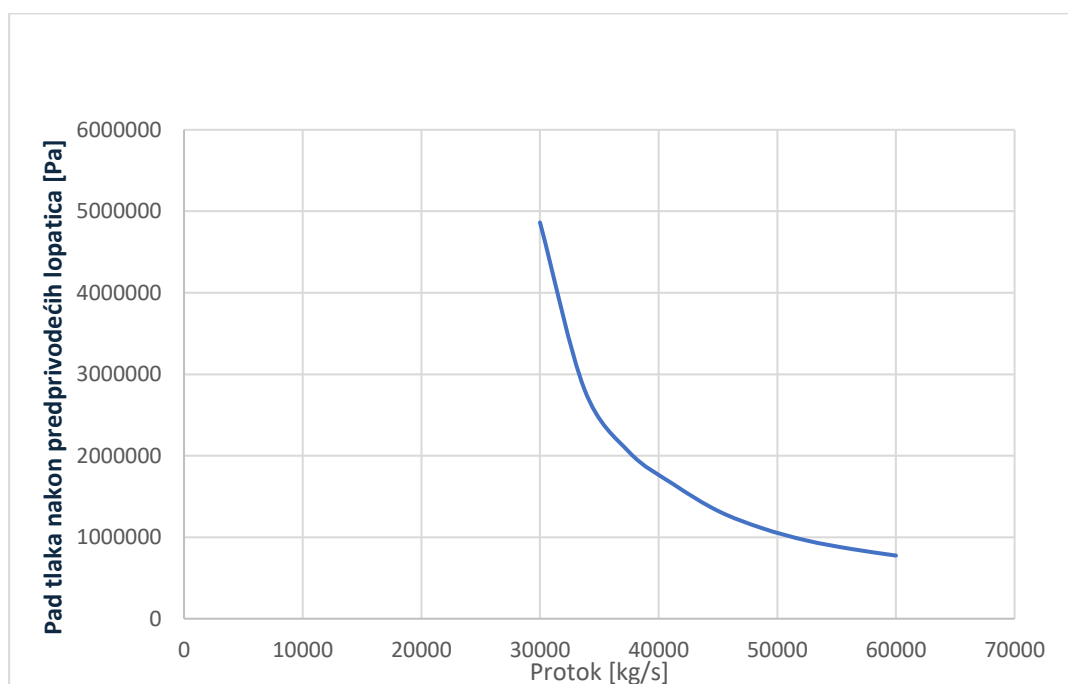
<b>Kutevi [°]</b>	<b>Protok [kg/s]</b>	<b>p_tot_inlet [Pa]</b>	<b>p_tot_outlet [Pa]</b>	<b><math>\Delta p</math> [Pa]</b>	<b>p_tot_spoj [Pa]</b>
<b>4</b>	30000	4867073.5	4205183	661890.5	4864411
<b>6</b>	33750	2818476	2403718	414758	2814249
<b>8</b>	37500	2052954.5	1438725	614229.4	2048568
<b>10</b>	41250	1657454.7	1530892	126562.5	1652132
<b>12</b>	45000	1331949	1243403	88545.7	1325383
<b>14</b>	48750	1120203.2	1055422	64781.2	1112949
<b>16</b>	52500	970918	900021	70897	962378
<b>18</b>	56250	869561.04	816077	53484.09	859757.8
<b>20</b>	60000	790860	745703	45157	779579

*Tablica 6-2 Tablica rezultata tlakova na ulazu i izlazu iz domene (konstantni protok)*

<b>Kutevi [°]</b>	<b>Protok [kg/s]</b>	<b>p_tot_inlet [Pa]</b>	<b>p_tot_outlet [Pa]</b>	<b><math>\Delta p</math> [Pa]</b>
<b>4</b>	45000	6243740	2624226	3619514
<b>6</b>	45000	6362929	2862604	3500325
<b>8</b>	45000	6856295	3849336	3006959
<b>10</b>	45000	6986656	4110058	2876598
<b>12</b>	45000	7376762	4890270	2486492
<b>14</b>	45000	8008320	6153386	1854934
<b>16</b>	45000	8542289	7221324	1320965
<b>18</b>	45000	8905616	7947978	957638
<b>20</b>	45000	513884	101263	412621



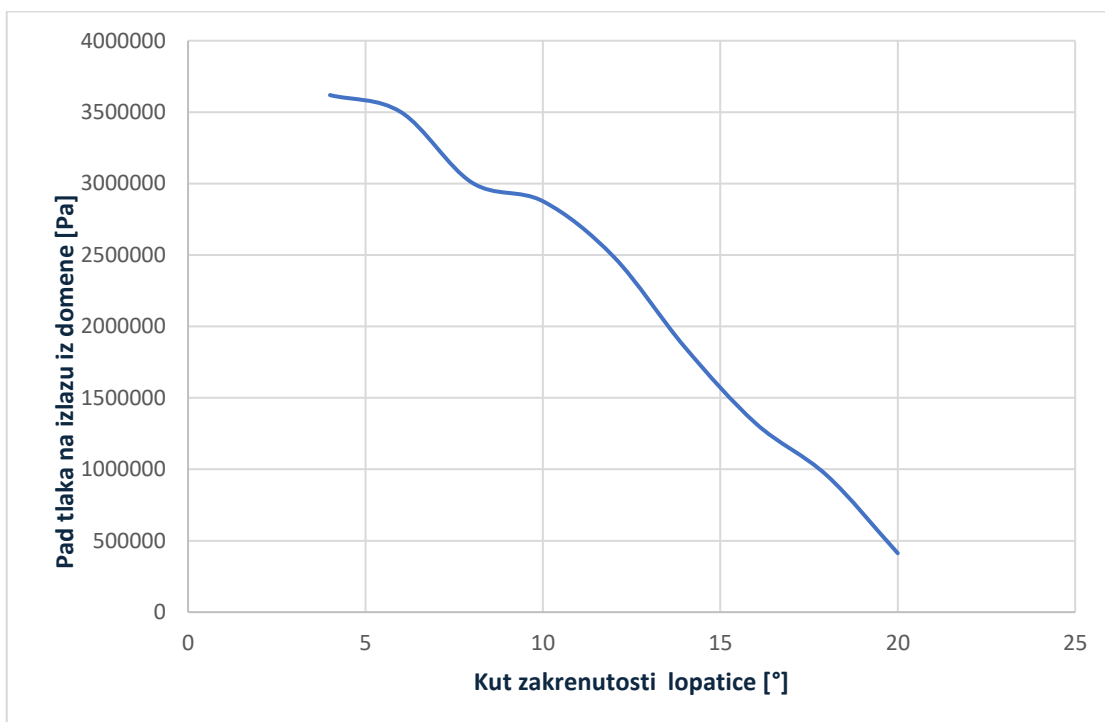
Slika 6-79 Ovisnost kuta zakrenutosti privodećih lopatica i pad tlaka na izlazu iz domene



Slika 6-80 Ovisnost protoka i pada tlaka nakon predprivodećih lopatica

U području kada fluid prođe predprivodeće lopatice razlika tlaka je veća kako povećavamo protok.





*Slika 6-81 Ovisnost kuta zakrenutosti privodećih lopatica i pada tlaka na izlazu iz domene (konstantan protok)*

## 7. ZAKLJUČAK

Nakon provedenih analiza protoka u režimu gdje smo linearno povećavali maseni protok s rastom zakrenutosti privodećih lopatica dobili smo očekivane rezultate gdje je vidljivo da pad tlaka, odnosno razlika između ukupnih tlakova između ulaza fluida u domenu i izlaza iz domene – outleta pada s rastom kutne zakrenutosti lopatica.

Vidljive su recirkulacijske zone u prostoru smanjene brzine fluida između krajeva i vrhova privodećih lopatica. Također vidljivo je i očekivano povećanje brzine fluida u prostorima između privodećih lopatica zbog smanjenja poprečnog presjeka kroz koji voda teče.

U režimu gdje je maseni protok fiksiran s rastom zakrenutosti privodećih lopatica također je vidljivo da pad tlaka, odnosno razlika između ukupnih tlakova između ulaza fluida u domenu i izlaza iz domene – outleta pada s rastom kutne zakrenutosti lopatica.

## 8. LITERATURA

- [1] Anderson, J.: Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications, McGraw-Hill, 1995.
- [2] Sharma, A. Schmid P., J.: Introduction to Computational Fluid Dynamics, Springer, 2022.
- [3] <https://tehnicki.lzmk.hr/clanak.aspx?id=4955>, s Interneta
- [4] Čarija, Z: Numeričko modeliranje hidrauličkih strojeva, s Interneta, <https://moodle.srce.hr>, 2021.
- [5] Čarija, Z: Validation of Francis Water Turbine CFD Simulations Strojarstvo : časopis za teoriju i praksu u strojarstvu, Vol. 50 No. 1, 2008.
- [6] Krishnamurthy R., 2020, s Interneta, <https://blog.gridpro.com/understanding-the-flow-through-francis-turbines/>
- [7] Cengel Y.: Fluid Mechanics Fundamentals and Applications, McGraw-Hill, 2013.
- [8] <https://www.hep.hr/elektra/trziste-elektricne-energije/izvori-elektricne-energije/1553>, s Interneta
- [9] <https://theconstructor.org/practical-guide/francis-turbines-components-application/2900/>, s Inteneta
- [10] White, F.: Fluid Mechanics, McGraw-Hill, 2015.

## SAŽETAK

U ovome je radu provedeno više analiza strujanja fluida u Francisovoj vodnoj turbini.. Analizirani su protoci za svaki položaj zakrenutosti privodećih lopatica kojih je ukupno 9. Nakon toga je napravljena analiza za sve položaje lopatice s fiksnim protokom. U Uvodu je dan pregled značajki vodnih turbina s posebnom pažnjom na Francisovu turbinu. Ukratko je objašnjena matematička i fizička pozadina numeričkih simulacija. Nakon toga objašnjeno je kako se crtala geometrija spirale i lopatica te nakon toga kako se za istu kreirala numerička mreža. Objašnjene su postavke za analizu u softveru FLUENT gdje je potom napravljen niz simulacija. Prikazane su vizualizacije rješenja kao i njihovo značenje te je na samom kraju donesen zaključak.

Ključne riječi: Francisova turbina, kut zakrenutosti privodećih lopatica, spirala, numerička mreža, CFD analiza

## ABSTRACT

In this work, several analyses of the fluid flow in the Francis water turbine were carried out. The flows were analyzed for each of the positions of the leading blades, of which there are a total of 9. After that, an analysis was made for all positions of the blade with a fixed flow. The Introduction provides an overview of the features of water turbines with special attention to the Francis turbine. The mathematical and physical background of numerical simulations is briefly explained. After that, it was explained how the geometry of the spiral and blades was drawn, and then how the numerical grid was created for it. The settings for the analysis in the FLUENT software were explained, where a series of simulations were then made. Visualizations of solutions and their meaning are shown, and at the very end, a conclusion is drawn.

Key words: Francis turbine, pitch angle of leading blades, spiral, numerical grid, CFD analysis