

# Analiza strujanja kroz difuzor vodne turbine tip 7

---

Mutevelić, Miran

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

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:190:874495>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-12**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski stručni studij strojarstva

Završni rad

**ANALIZA STRUJANJA KROZ DIFUZOR VODNE TURBINE TIP 7**

Rijeka, rujan 2022.

Miran Mutevelić  
0036458840

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski stručni studij strojarstva

Završni rad

**ANALIZA STRUJANJA KROZ DIFUZOR VODNE TURBINE TIP 7**

Mentor: Prof. dr. sc. Zoran Čarija

Rijeka, rujan 2022.

Miran Mutevelić  
003645884

## **IZJAVA**

Izjavljujem da sam prema članku 8. Pravilnika o završnom radu, završnom ispitu i završetku studija preddiplomskih sveučilišnih studija Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, samostalno izradio završni rad naslova „Analiza strujanja kroz difuzor vodne turbine tip 7“ pod vodstvom prof. dr. sc. Zorana Čarije.



# SADRŽAJ

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 1.     | UVOD .....   | 1  |
| 2.     | O VODNIM TURBINAMA .....                             | 3  |
| 2.1.   | Peltonove turbine .....                              | 5  |
| 2.2.   | Francisove turbine.....                              | 6  |
| 2.3.   | Kaplanove turbine .....                              | 7  |
| 2.4.   | Cijevne turbine.....                                 | 8  |
| 3.     | DIFUZORI .....                                       | 9  |
| 3.1.   | Konusni difuzor .....                                | 10 |
| 3.2.   | Jednostavni koljenasti difuzor.....                  | 10 |
| 3.3.   | Moodyjev šireći difuzor.....                         | 10 |
| 3.4.   | Koljenasti difuzor s promjenjivim presjekom.....     | 10 |
| 3.5.   | Prednosti korištenja difuzora .....                  | 11 |
| 4.     | GUBICI U TURBINI .....                               | 12 |
| 5.     | NUMERIČKA ANALIZA .....                              | 16 |
| 5.1.   | Definiranje geometrije .....                         | 16 |
| 5.2.   | Definiranje numeričke mreže ( <i>Meshing</i> ) ..... | 18 |
| 5.3.   | Postavljanje simulacije.....                         | 22 |
| 6.     | REZULTATI.....                                       | 23 |
| 6.1.1. | Brzina strujanja.....                                | 23 |
| 6.1.2. | Statički tlak.....                                   | 25 |
| 6.1.3. | Dinamički tlak .....                                 | 27 |
| 6.1.4. | Apsolutni tlak .....                                 | 28 |
| 6.2.   | Strujnice .....                                      | 30 |
| 6.2.1. | Strujnice pri $V_1$ .....                            | 30 |

|        |                               |    |
|--------|-------------------------------|----|
| 6.2.2. | Strujnice pri $V_2$ .....     | 32 |
| 7.     | ZAKLJUČAK .....               | 35 |
| 8.     | LITERATURA.....               | 36 |
| 9.     | POPIS SLIKA .....             | 37 |
| 10.    | SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI..... | 39 |
| 9.     | ABSTRACT .....                | 40 |

# 1. UVOD

Hidroelektrane su postrojenja koja energiju vodotoka pretvaraju u električnu energiju. Čine značajan udio izvora električne energije u elektroenergetskim sustavima u svijetu. Spadaju u obnovljive izvore električne energije, a zbog fleksibilnosti u načinu i vremenu rada, dobro se kombiniraju s drugim izvorima električne energije. Fleksibilnost u smislu akumulacije vode i izbora režima rada čine vodnu energiju gotovo idealnim izvorom za proizvodnju električne energije.

Vodna energija se crpi tako da se u prirodni sustav kruženja vode ugradi vodna turbina. Takvu prirodnu cirkulaciju pokreće Sunce, kojeg možemo smatrati prirodnom crpkom, koje svojom toplinskom energijom ishlapljuje vodu s vodenih površina mora, rijeka, jezera itd. Nastala vodena para se, razlikom u gustoći, podiže u više slojeve atmosfere gdje se kondenzira, stvarajući oblake. Pokrenuti zračnim strujama, oblaci se često nađu iznad predjela veće nadmorske visine, gdje se oborinama vraćaju na zemlju. U takvim područjima veće nadmorske visine voda ima visoku potencijalnu energiju, koju se iskorištava tako da se na silazni tok stvorenih vodenim masa postavljaju vodne turbine.

U sustav hidroelektrane se ubrajaju svi objekti i dijelovi koji služe za sakupljanje, odvođenje i dovođenje vode, te za pretvorbu i razvod proizvedene električne energije. Tako u sustav hidroelektrane spadaju: pregrada ili brana, zahvat, dovod vode, vodna komora, tlačni cjevovod, strojarnica i odvod vode.

Strojarnica je zgrada u kojoj su smještene turbine, generatori, transformator, akumulatorska baterija, i svi ostali strojevi i uređaji koji omogućuju transformaciju energije vode u električnu energiju. Transformacija energije u hidroelektranama odvija se korištenjem potencijalne i/ili kinetičke energije vode, koja se u akcijskim ili reakcijskim vodnim turbinama pretvara u mehaničku energiju rotacije, a koja se vratilom prenosi do generatora u kojemu se pretvara u električnu energiju.

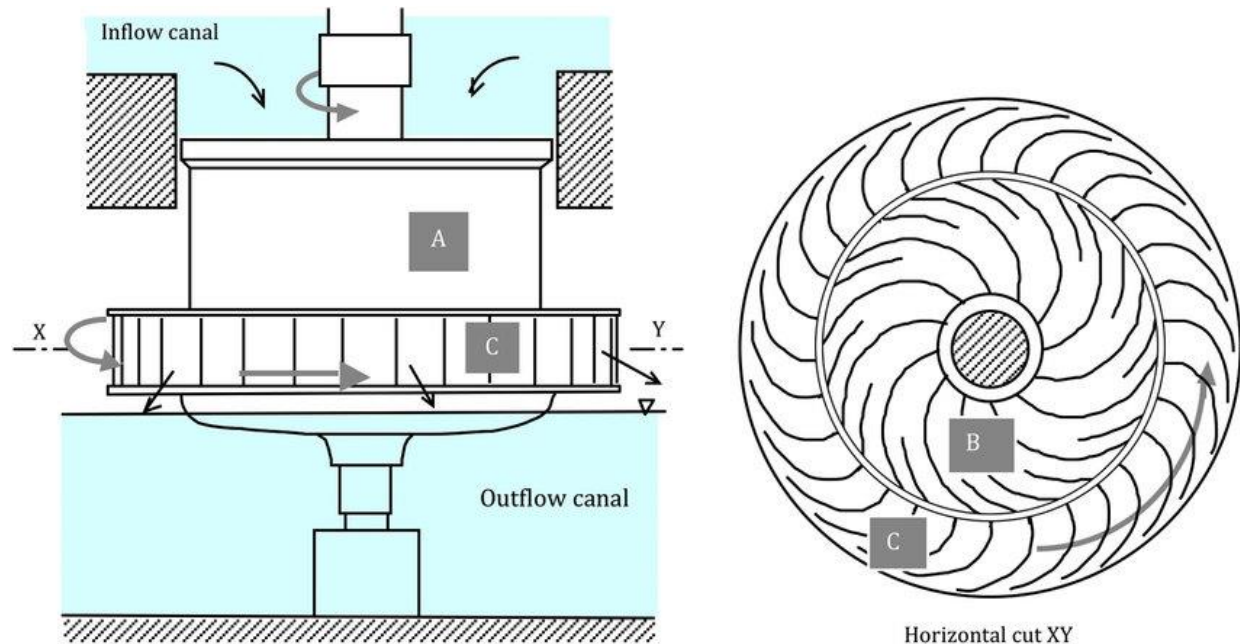
Jasno je da je u svakom pogledu, želja i cilj iskorištavati cjelokupnu dostupnu energiju vodnog potencijala, i u tu se svrhu kontinuirano radi, kako bi se došlo do novih rješenja ili sustava. Gubici su nezaobilazna pojava u radu hidroelektrana, kroz cijeli sustav, i potreba za smanjivanjem tih gubitaka stalno je prisutna.



Ovaj rad se fokusira na gubitke u samoj turbini, odnosno u difuzoru turbine, numeričkom analizom protoka vode kroz difuzor vodne turbine. Zadatak ovog rada je dakle postavljanje numeričke analize protoka kroz difuzor Francisove vodne turbine, i pregled dobivenih rezultata, kako bi se analizirali dobivene simulacije i pojave vezane uz gubitke u sustavu. U prvom poglavlju dan je pregled vrsta vodnih turbina . Drugo poglavlje je fokusirano na difuzore i njihovu primjenu u turbinama. U trećem poglavlju govori se o gubicima u hidroenergetskim postrojenjima, nakon čega će se prikazati numerička analiza strujanja u difuzoru za dva različita protoka vode.

## 2. O VODNIM TURBINAMA

Vodne turbine su rotacijski hidraulički strojevi koji energiju vode pretvaraju u mehanički rad. Zovu se još i hidraulički motori [1]. Razvoj modernih turbina započinje 1837. godine, kada je Benoît Fourneyron, francuski inženjer, proizveo prvu modernu vodnu turbinu (Slika 2.1.)



Slika 2.1. Shema Fourneyronove turbine [2]

U Fourneyronovoj turbini voda struji od osovine prema obodu tako da se strujanje vode usmjerava lopaticama statora prema rotoru, a rotacijom rotora energija vode pretvara u mehaničku energiju.

Nakon toga, razvila su se današnja tri osnovna tipa turbina. Francisova turbina (konstruirana 1847. godine), koju je konstruirao britansko-američki inženjer James Bicheno Francis, upotrebljava se za padove do 500 m, a izvodi se s horizontalnom ili vertikalnom osovinom. Godine 1878. Amerikanac Lester Allan Pelton konstruirao je vodnu turbinu slobodna mlaza, po njemu nazvanu Peltonova turbina. Izvodi se s jednom ili više mlaznica, a upotrebljava se za padove veće od 500 m. 1922. godine austrijski profesor Viktor Kaplan smišlja Kaplanovu turbinu za manje padove i veće

protoke, koja može biti izvedena s pomičnim (Kaplanovim) ili čvrstim rotorskim lopaticama (propelerna turbina).

Vodne turbine mogu se podijeliti na tri načina: prema stupnju reakcije (stalnosti tlaka); prema pravcu strujanja vode u rotoru; prema koeficijentu brzohodnosti [1]. Prema stupnju reakcije, turbine se dijele na akcijske i reakcijske. Turbine koje rade bez promijene tlaka od ulaza do rotora zovu se akcijske ili stalnotlačne. Kod njih se brzina vode mijenja od ulaza u rotor do izlaza iz rotora, pri čemu je brzina na izlazu iz rotora mnogo manja. Toj skupini pripada Peltonova turbina. Turbine kod kojih se dio energije do ulaza u rotor pretvara u brzinu, a preostali dio energije čini tlak na ulazu u rotor, reakcijske su ili pretlačne. Toj skupini pripadaju Francisova i Kaplanova turbina.

Prema pravcu strujanja vode u rotoru, turbine se dijele na:

- aksijalne (Kaplanova)
- radijalno-aksijalne (Francisova)
- tangencijalne (Peltonova).

Vodne turbine se grade za koeficijente brzohodnosti ( $n_s$ ) od  $n_s = 2$  do 1200. Općenito, turbine većeg koeficijenta brzohodnosti su brže, imaju veći protok i manji pad. Prema koeficijentu brzohodnosti turbine su svrstane u tri grupe:

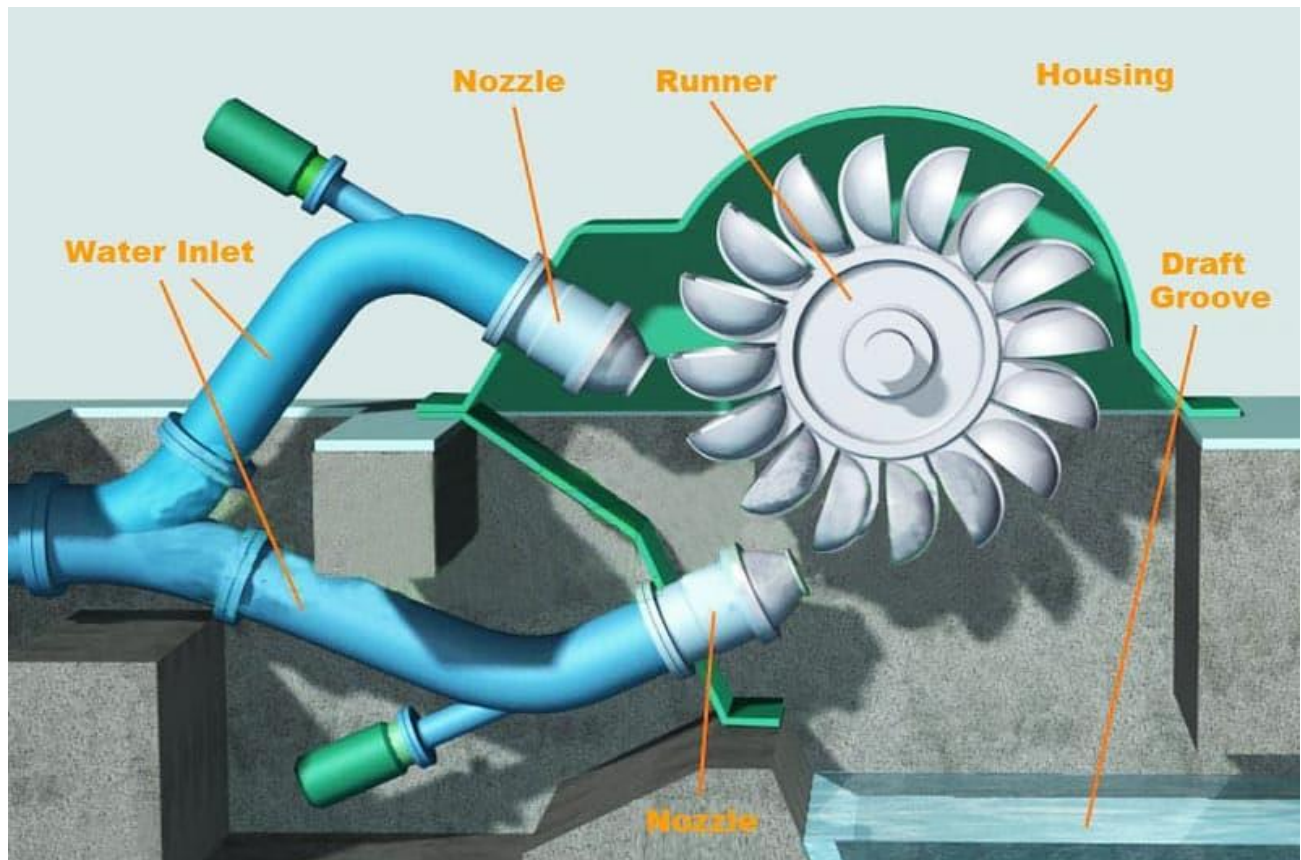
1. Peltonova turbina:  $n_s = 2 - 10$ , sporohodne,  
 $n_s = 10 - 20$ , normalne,  
 $n_s = 20 - 50$ , brzohodne;
2. Francisova turbina:  $n_s = 40 - 180$ , sporohodne,  
 $n_s = 180 - 250$ , normalne,  
 $n_s = 250 - 550$ , brzohodne;
3. Kaplanova turbina:  $n_s = 400 - 1200$ .

U hidroelektranama se koriste Peltonove, Francisove, Kaplanove i cijevne turbine.

## 2.1. Peltonove turbine

Peltonove turbine koriste isključivo kinetičku energiju vode. Na mlaz vode djeluje atmosferski tlak, pa se zovu još i turbine slobodnog mlaza. Grade se za koeficijente brzohodnosti od 2 do 50. Upotrebljavaju se u hidroelektranama brdskih predjela gdje su padovi od 400 do 2000 m i protoci vode mali. Glavni dijelovi turbine su radno kolo, mlaznice i kućište (Slika 2.2.).

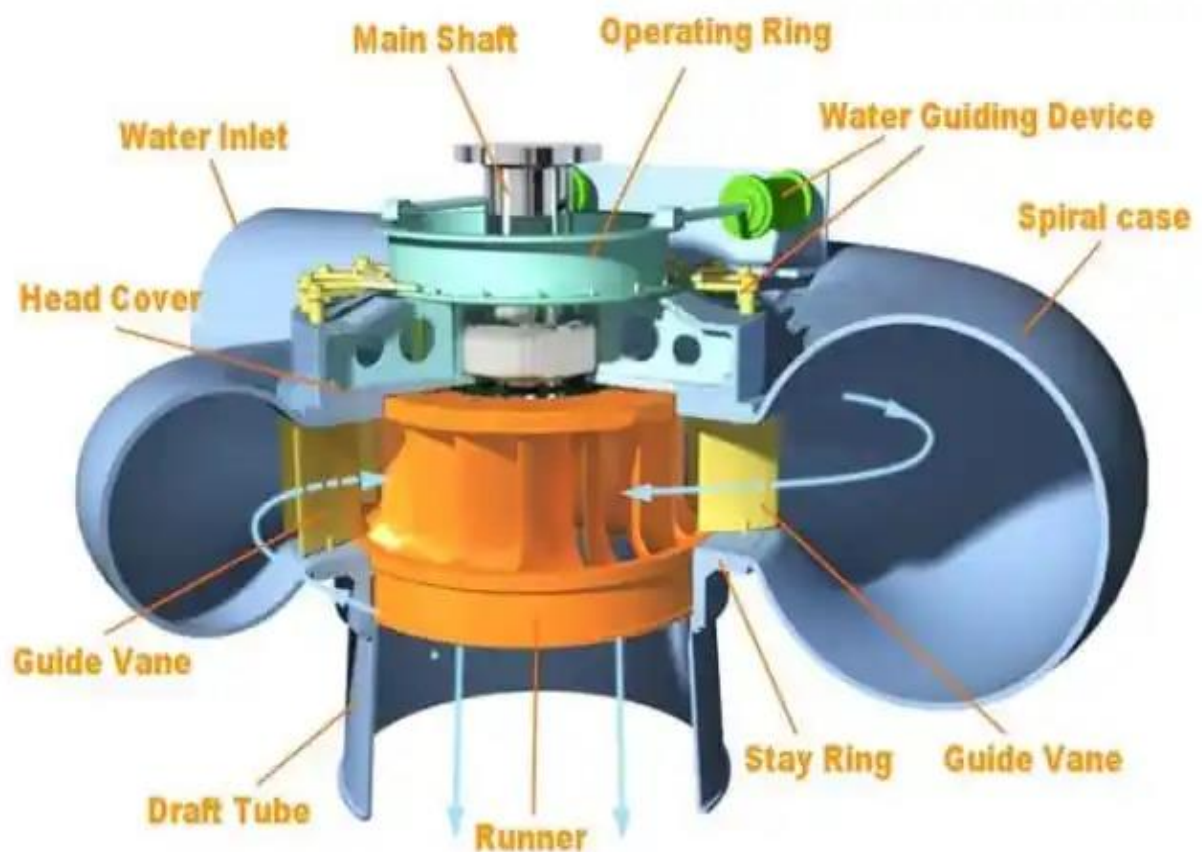
Voda se u turbinu dovodi tlačnom cijevi u jednoj, dvije ili više mlaznica. Mlaz tekućine udara u ulazni rub lopatice pod kutem od  $180^\circ$  i izlazi izlaznim rubom iz lopatice. Promjenom količine gibanja mlaza okreće se rotor turbine. Rotor je zatvoren u kućištu, a posebnim kanalom ispod turbine voda se odvodi u riječni tok. Peltonove turbine izvede se s vertikalnim ili horizontalnim vratilom.



Slika 2.2. Shema Peltonove turbine [3]

## 2.2. Francisove turbine

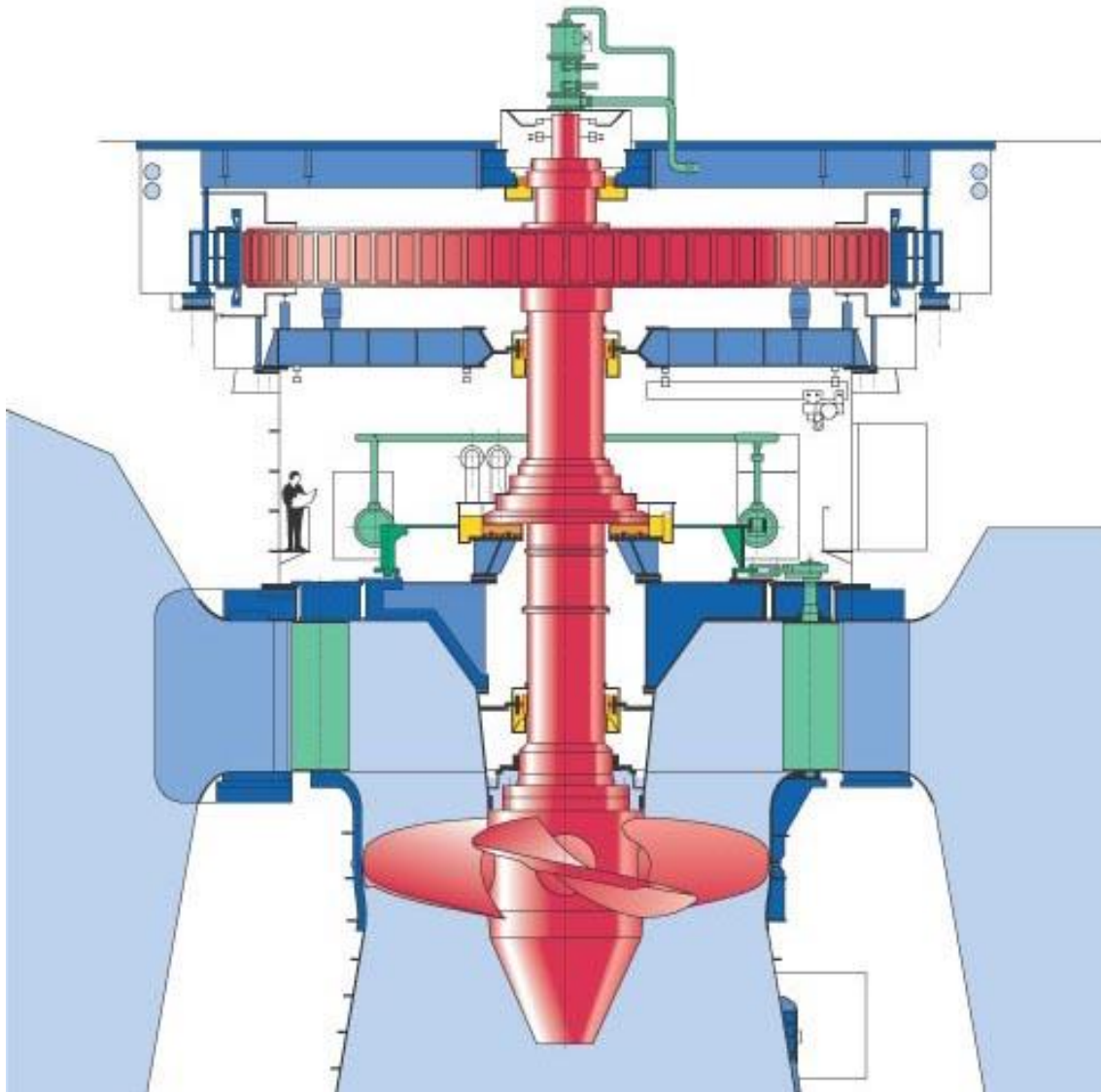
Francisove turbine su reakcijske turbine s koeficijentom brzohodnosti od 50 do 550, korištene za padove od 25 do 500 m. To su radijalno-aksijalne turbine. Voda lopaticama rotora stiže po cijelom obodu preko statora. Glavni dijelovi Francisove turbine su spiralno kućište, statorsko kolo s pomičnim lopaticama, rotor s profiliranim lopaticama, te difuzor za odvod vode iz rotora (Slika 2.3.). Francisove turbine mogu imati horizontalno ili vertikalno vratilo. Vertikalna izvedba je češća i stabilnija jer su vibracije manje. Uz turbinu je i servomotor za regulaciju rada turbine koja se provodi reguliranjem položaja statorskih lopatica.



Slika 2.3. Shema Francisove turbine [4]

### 2.3. Kaplanove turbine

Kaplanove turbine su aksijalne reakcijske turbine velikog koeficijenta brzohodnosti od 400 do 1200. Koriste se za padove do 30 m. Na slici 2.4. prikazan je presjek Kaplanove turbine. Iz spiralnog kućišta voda ulazi kroz statorske lopatice u rotor s pomičnim lopaticama. Promjenom položaja lopatica rotora bolje se iskorištava energija vode pri promjeni režima strujanja vode.

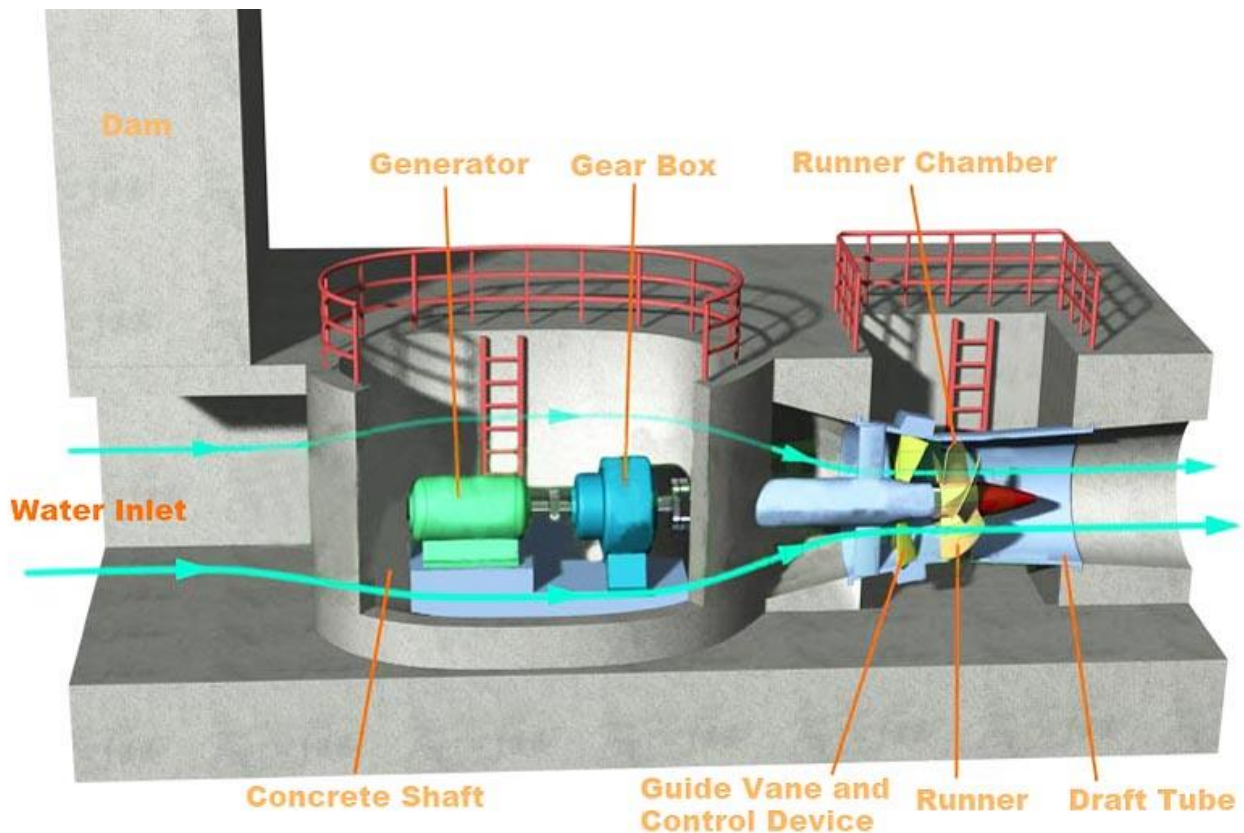


*Slika 2.4. Shema Kaplanove turbine [5]*



## 2.4. Cijevne turbine

Za velike protoke vode i male padove od nekoliko metara koriste se cijevne turbine. U cijevnim je turbinama spiralno kućište Kaplanove turbine zamijenjeno cijevi kojom se voda usmjerava prema sprovodnom kolu. Tako se dobije jednostavnija i jeftinija konstrukcija. Turbina je aksijalna, i s generatorom (u specijalnoj metalnoj brtvljenoj čahuri) je smještena u cijev kroz koju prolazi voda.



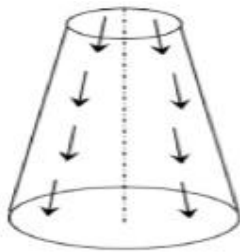
Slika 2.5. Shema Cijevne turbine

### 3. DIFUZORI

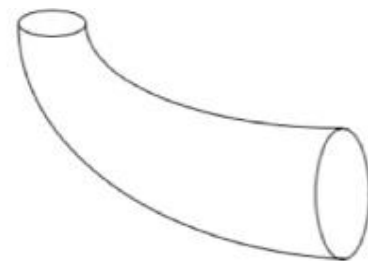
Difuzori su konično prošireni kanali koji se obično postavljaju na izlaz ili ispuh turbine kako bi pretvorili kinetičku energiju vode u statički tlak. U difuzoru se, dakle, zbiva proces suprotan onome u sapnici. Ta pretvorba energije sprječava rasipanje kinetičke energije vode na izlazu iz turbine. Primarna funkcija difuzora je kontrola protoka vode kroz turbinu. Najčešće su dijelovi reakcijskih turbina, poput Kaplanove ili Francisove.

Četiri su glavna tipa difuzora [6] (Slika 3.1):

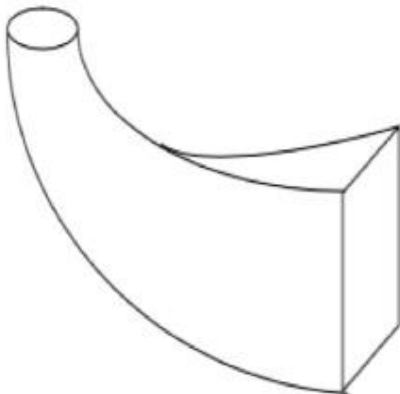
1. Konusni difuzor
2. Jednostavni koljenasti difuzor
3. Moodyjev šireći difuzor
4. Koljenasti difuzor s promjenjivim presjekom



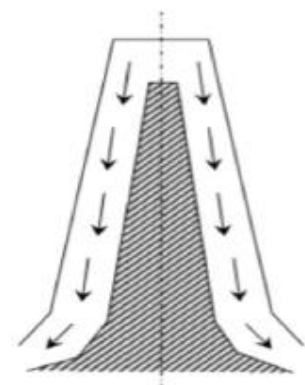
Simple Conical Draft Tube



Simple Elbow Draft Tube



Elbow Draft Tube with Varying Cross Section



Moody draft tube

Slika 3.1. Vrste difuzora [7]



### **3.1. Konusni difuzor**

U ovom difuzoru, smjer protoka je ravan i divergentan. Konusnog je oblika, a izlazni promjer veći je od ulaznog. Konusni kut ne smije biti prevelik da ne izazove odstupanje protoka od stijenke difuzora, a ne bi trebao biti ni premali, jer bi to zahtijevalo veću duljinu difuzora, što bi donijelo znatne gubitke kinetičke energije, tako da je kut proširenja gotovo  $10^\circ$ .

### **3.2. Jednostavni koljenasti difuzor**

Oblik cijevi kod jednostavnog koljenastog difuzora je poput koljena, a površina poprečnog presjeka ostaje ista. Ulaz i izlaz su kružnog poprečnog presjeka. Koristi se u Kaplanovoj turbini. Koristi se na niskim položajima i postavlja se odmah do odvodnog kanala. Pomaže minimizirati trošak konstrukcije, a izlazni promjer bi trebao biti što je moguće širi, kako bi se povratila kinetička energija na izlazu klizača. Ovaj difuzor ima umjerenu efikasnost od 60%.

### **3.3. Moodyjev šireći difuzor**

Ovaj difuzor sličan je konusnom difuzoru, ali za razliku od njega ima središnju jezgru koja dijeli izlaz na dva dijela, tako se sastoji od jednog ulaza i dva izlaza. Glavni cilj ovakvog difuzora je smanjiti vrtložno gibanje vode kako bi se smanjili gubici. Učinkovitost ove vrste dizajna difuzora je gotovo 88%.

### **3.4. Koljenasti difuzor s promjenjivim presjekom**

Ovaj difuzor je poboljšana verzija jednostavnog koljenastog difuzora. Ulaz je kružni, a izlaz je pravokutan. Vodoravni dio cijevi je nagnut prema gore kako bi se spriječio pristup zraku u izlaz difuzora. Ova vrsta difuzora ima promijenjeni poprečni presjek od ulaza do izlaza. Izlaz je i dalje ispod odvodnog kanala. Učinkovitost mu je oko 70%.

### 3.5. Prednosti korištenja difuzora

Korištenje difuzora donosi nekoliko važnih prednosti:

1. Sprječava prskanje rotora i odvodi vodu na odvodni kanal.
2. Neto visina pada turbine se povećava jer se povećava razlika visine između turbine i odvodnog kanala postavljanjem difuzora ispod kućišta.
3. Smanjuje potrebnu kinetičku energiju na izlazu iz turbine
4. Pretvorba kinetičke energije u statički tlak rezultira negativnom tlačnom padu što poboljšava ukupan učinak turbine.

## 4. GUBICI U TURBINI

Ukupni gubici u turbini sastoje se od hidrauličkih gubitaka, gubitaka vode i mehaničkih gubitaka [1].

Kada se računa neto-pad na osnovi razlika kota, prepostavi se konstantna razina gornje vode ( $H_b$  – bruto pad), zatim se određuje visina donje vode ( $H_{dv}$ ), te, uzimajući u obzir gubitke pada u dovodu ( $\Delta H_d$ ) i odvodu ( $\Delta H_0$ ), dobiva se jednačba za neto-pad (4.1):

$$H_n = H_b - H_{dv} - \Delta H_d - \Delta H_0 \quad (4.1)$$

gdje je:

$H_b$  – bruto pad

$H_{dv}$  – visina donje vode

$\Delta H_d$  – pad u dovodu

$\Delta H_0$  – pad u odvodu.

Da bi se odredio ukupan hidraulički stupanj djelovanja turbine ( $\eta_h$ ), potrebno je napomenuti da, uz gubitke u statoru ( $H_S$ ) i rotoru ( $H_R$ ), postoje gubici u difuzoru ( $H_D$ ) (koji ovise o kvadratu brzine strujanja, o obliku i izvedbi difuzoru, te o Reynoldsovoj značajki ( $Re$ )), i gubici na izlazu iz difuzora ( $H_i$ ). Prema tome, za hidraulički se stupanj djelovanja turbine može pisati:

$$\eta_h = 1 - \frac{H_S + H_R + H_D + H_i}{H_n} \quad (4.2)$$

gdje je:

$H_S$  – gubitak u statoru

$H_R$  – gubitak u rotoru

$H_D$  – gubitak u difuzoru

$H_i$  – gubitak na izlazu iz difuzora.

Hidraulički gubici su prisutni kao posljedica gibanja fluida, i nije ih moguće izbjeći [8]. Pravilnom konstrukcijom hidrauličkih dijelova moguće ih je svesti na minimalnu ili prihvatljivu razinu. Dijele se na gubitke trenja i na gubitke uslijed odvajanja struje (sudarni gubici). Pravilnom konstrukcijom se nastoji izbjeći odvajanje struje fluida od čvrstih stijenki.

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

$$h_{gub,i} = k_i \cdot \frac{1}{2g} \cdot \left( \frac{Q}{A_{spi}} \right)^2 \quad (4.3)$$

gdje je:

$Q$  – protok

$A_{spi}$  – površina ulaznog presjeka spirale

$k_i$  – koeficijent lokalnog otpora

-ovisno o potrebi indeks “i” može biti “spi” (spirala) ili “ppl” (predprivodeće lopatice) [8].

Koeficijent lokalnog otpora ( $k$ ) je konstantan i hidraulički opisuje konstrukciju sa stanovišta gubitaka. Gubici rastu s kvadratom protoka, te je pravilnom konstrukcijom potrebno osigurati što niži koeficijent lokalnog otpora.

Gubici strujanja u rotoru su posljedica gubitaka trenja, gubitaka uslijed odvajanja struje fluida od čvrste stijenke te gubitaka naglog suženja i proširenja. Gubitke trenja je moguće opisati sljedećim izrazom:

$$h_{gub,rot} = k_{rot} \frac{w_f^2}{2g} \quad (4.4)$$

gdje je:

$k_{rot}$  – koeficijent lokalnog otpora rotora

$w_r$  – srednja relativna brzina u rotorskom kanalu

Kod rotora s nepomičnim lopaticama je koeficijent lokalnog otpora konstantan, za razliku od rotora s pomičnim lopaticama (Kaplanova turbina), gdje je uslijed promjene geometrije kanala koeficijent promjenjiv.

Osim hidrauličkih gubitaka u statoru i rotoru (zbog trenja i promjena brzine), u turbini postoje i gubici vode, odnosno volumetrički gubici. Naime, sva količina vode koja prođe kroz stator ne uspije proći kroz rotor, jer se dio vode gubi kroz raspore između statora i rotora ( $\Delta Q$ ). Ako kroz stator protječe količina vode  $Q$ , a kroz rotor  $Q - \Delta Q$ , tada se za volumetrijski stupanj djelovanja turbine može napisati:

$$\eta_v = \frac{Q - \Delta Q}{Q} \quad (4.4).$$

Ove gubitke je moguće smanjiti pravilnim dosjedom rotirajućih i nepomičnih dijelova te upotrebom labirintnih brtvi koje prigušenjem bitno smanjuju količinu prestrujanog fluida.

Da bi se dobio ukupan stupanj djelovanja, potrebno je još odrediti mehanički stupanj djelovanja  $\eta_m$ . Mehanički gubici nastaju zbog toga što je potrebno svladati otpore trenja u ležajevima i brtvenicama turbine, zatim otpor koji nastaje ventilacijom zbog okretanja rotora i otpora vode koja se gubi između statora i rotora. Dakle, ukupan stupanj djelovanja turbine je:

$$\eta_t = \eta_h \cdot \eta_v \cdot \eta_m \quad (4.4)$$

gdje je:

$\eta_h$  – hidraulički stupanj djelovanja turbine

$\eta_v$  – volumetrijski stupanj djelovanja turbine

$\eta_m$  – mehanički stupanj djelovanja turbine.

Slično kao i kod rotora, gubici u difuzoru posljedica su gubitaka trenja i gubitaka uslijed odvajanja struje fluida od čvrste stijenke [8]. Pravilnom konstrukcijom moguće je izbjeći gubitke odvajanja. Kod difuzora izvedenih u obliku zavoja koljeno predstavlja dodatni lokalni otpor kojeg treba pribrojiti gubicima trenja. Gubitke u difuzoru moguće je opisati sljedećim izrazom:

$$H_{gub,dif} = k_{dif} \cdot \frac{v_2^2}{2g} \quad (4.5)$$

gdje je:

$k_{dif}$  – koeficijent lokalnog otpora difuzora,

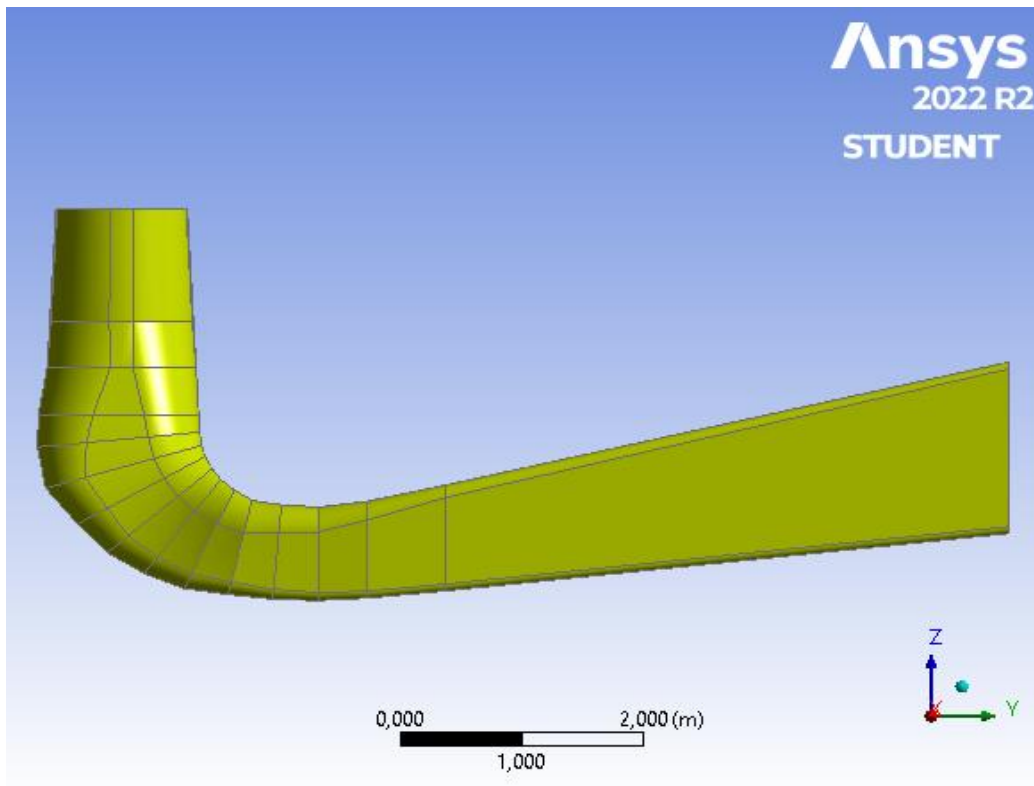
$v_2$  – brzina na ulazu u difuzor.

## 5. NUMERIČKA ANALIZA

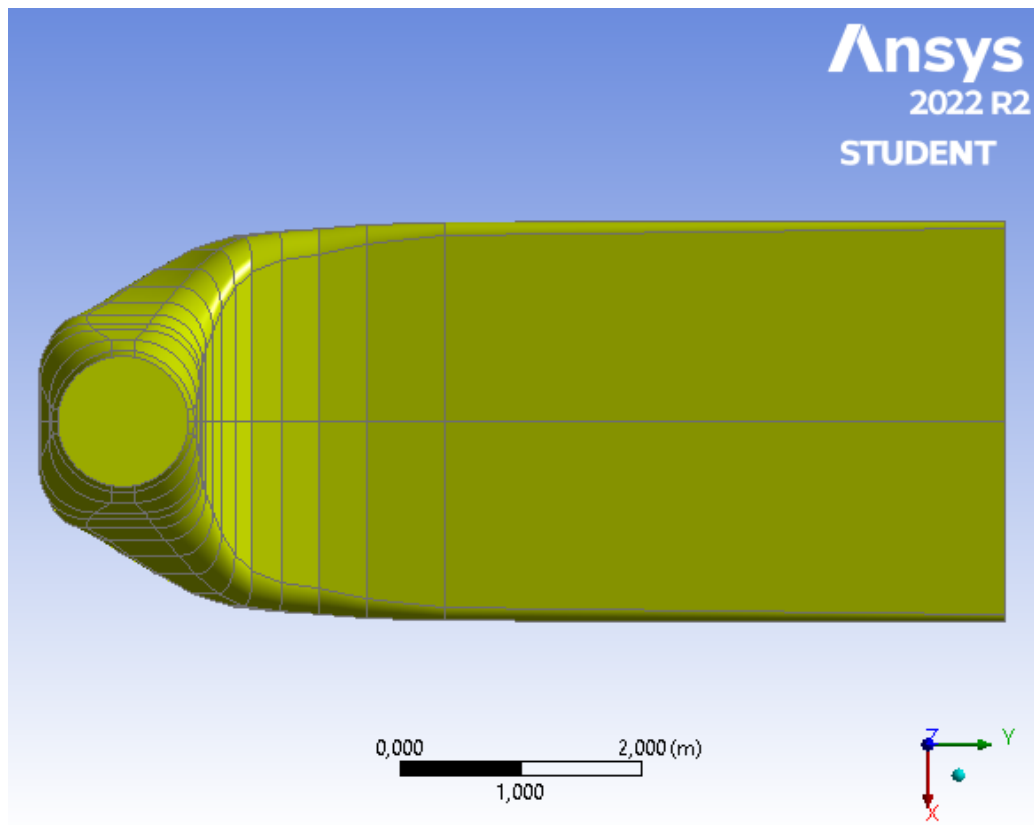
Numerička analiza se u ovom radu provodi pomoću Ansysovog CFD (*Computational Fluid Dynamics*) programa za rješavanje problema toka fluida pomoću numeričke analize i strukture podataka. Računalom se izvode izračuni potrebni za simulaciju slobodnog toka fluida i njegovu interakciju s određenim rubnim uvjetima ovisnima o zadatku simulacije. Zadatak se provodi u nekoliko faza danih u sljedećim potpoglavljima.

### 5.1. Definiranje geometrije

Geometrija je zadana i dana kao CAD file, i definirana je u Ansysovim datotekama kao STEP file, a predstavlja model koljenastog difuzora s promjenjivim presjekom (Slike 5.1., 5.2. i 5.3.). Predstavlja početak razmatranja i analize strujanja fluida unutar difuzora, jer se pomoću geometrije postavljaju granice i rubni uvjeti numeričke analize strujanja fluida.

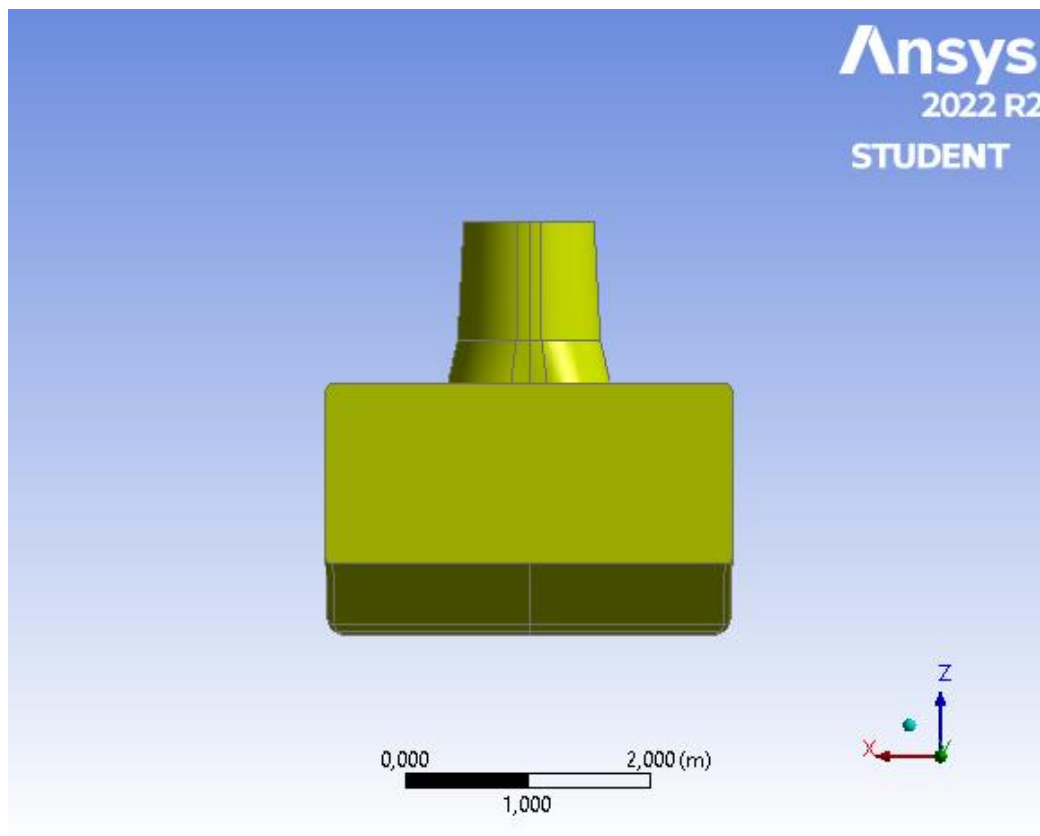


*Slika 5.1. Nacrt geometrije difuzora*



*Slika 5.2. Tlocrt geometrije difuzora*

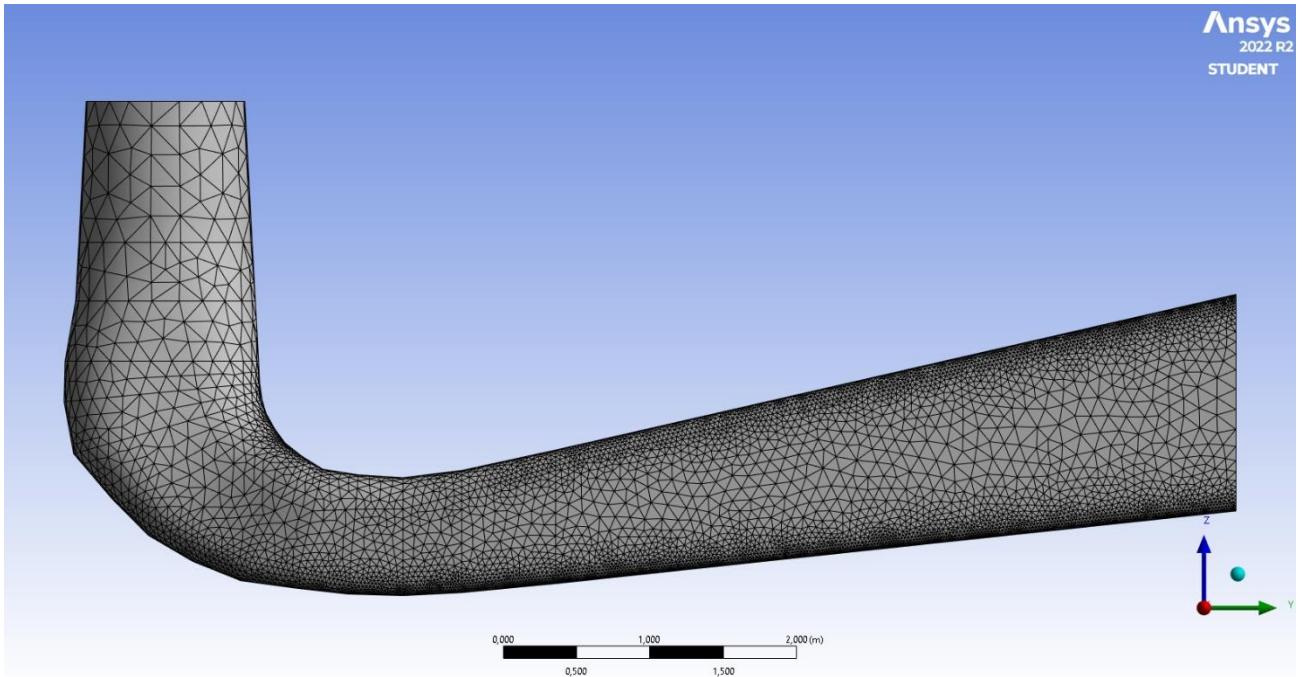




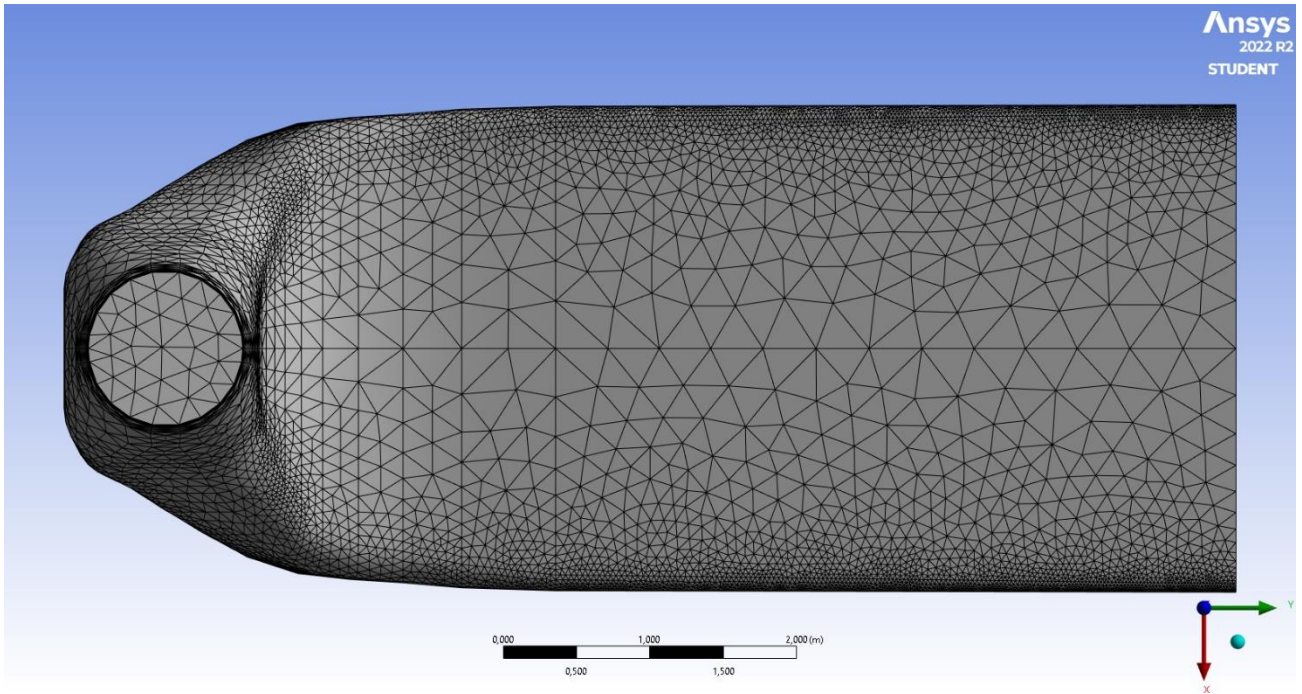
*Slika 5.3. Bokocrt geometrije difuzora*

## **5.2. Definiranje numeričke mreže (*Meshing*)**

*Meshing*, ili generiranje mreže, je proces generiranja dvodimenzionalne ili trodimenzionalne numeričke mreže (Slike 5.4., 5.5. i 5.6.), kojom se definiraju diskretna područja u kojima se rješavaju jednačbe koje će opisivati ponašanje fluida u simulaciji. Predstavlja diskretizaciju prostora konačnim elementima.

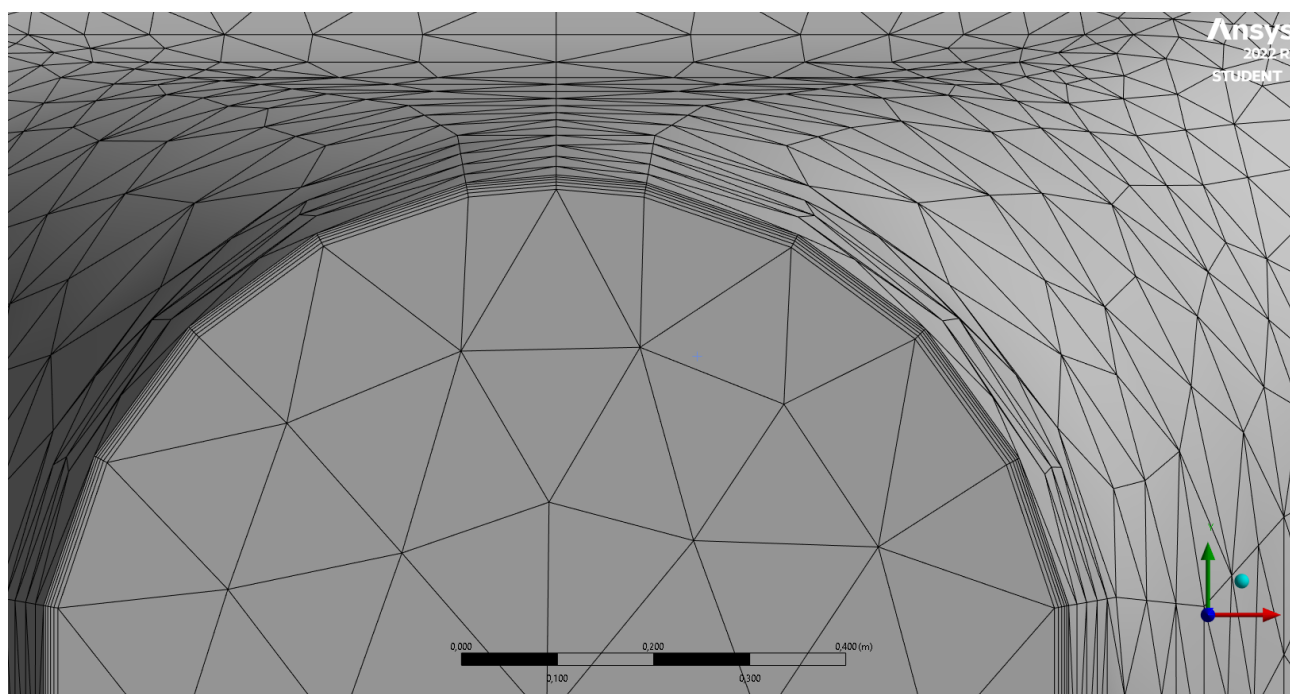


*Slika 5.4. Nacrt numeričke mreže*



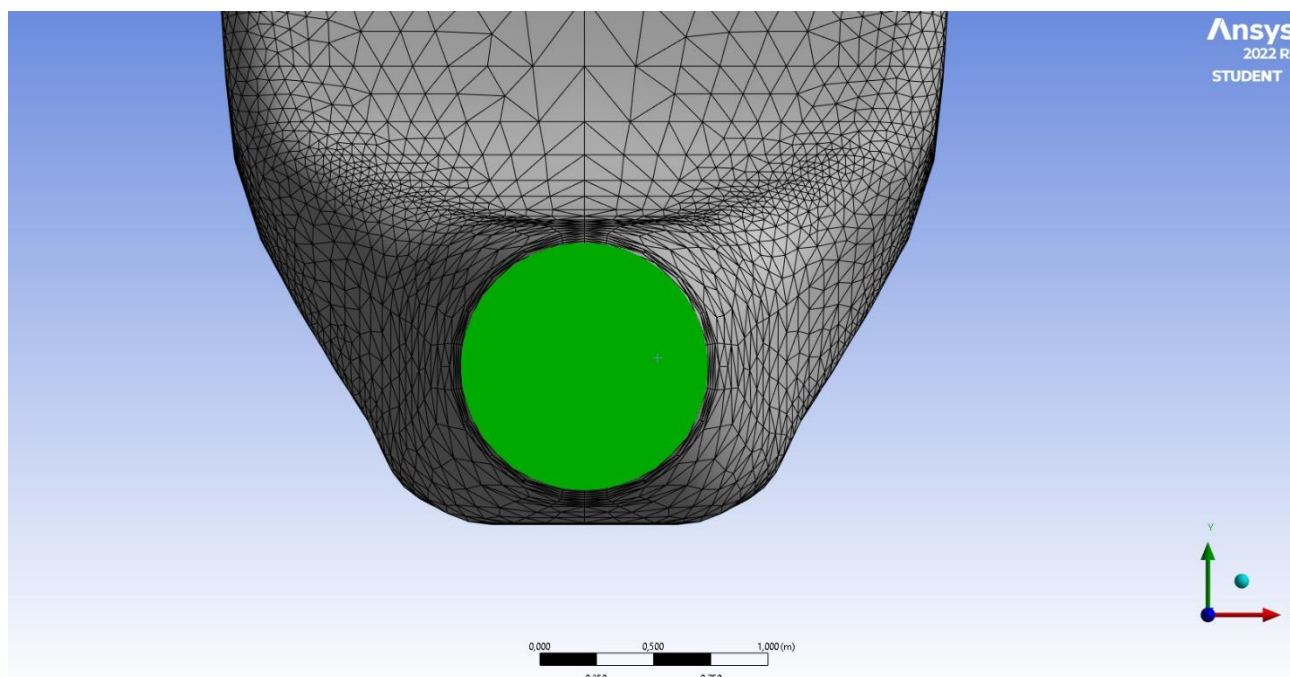
*Slika 5.5. Tlocrt numeričke mreže*

Osim prostora unutar difuzora, potrebno je definirati i rubove difuzora, koji predstavljaju tzv. *Boundary layere*, odnosno rubne zidove na kojima je brzina fluida jednaka nuli. Kako bi se točno izračunali parametri strujanja u blizini zidova, numeričku je mrežu zgusnuti u blizini rubova, odnosno zidova, što predstavlja funkcija *Inflation*. U ovom je zadatku korištena *First Layer Thickness* metoda definiranja rubova strujanja fluida (Slika 5.5.), koja definira polja uz nepomični zid, tako da se odaberu debljina prvoga sloja, broj slojeva koji će biti definirani kao rubni, i prirast veličine tih slojeva, od zida prema unutrašnjosti difuzora. U ovom je zadatku odabrano 5 rubnih slojeva, s debljinom prvog sloja od 0,002 m i prirastom od 1,2 (Slika 5.6.).

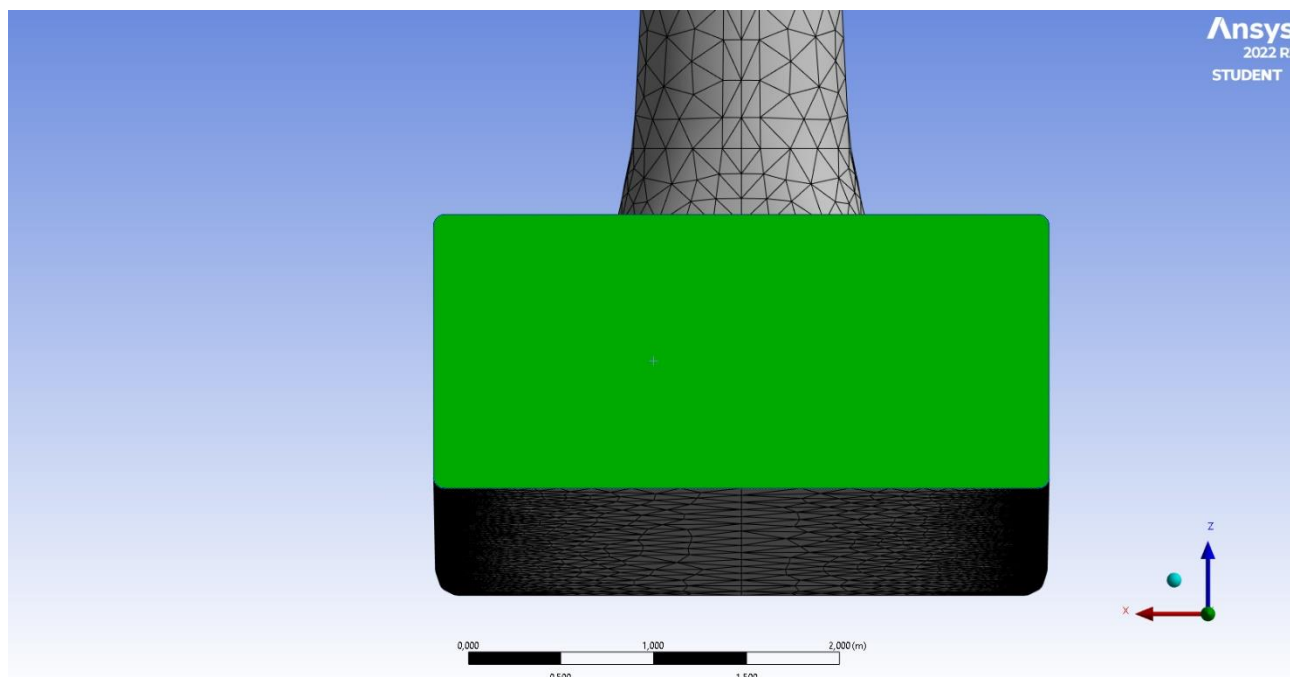


Slika 5.6. Prikaz rubnih slojeva numeričke mreže

Nakon definiranja rubnih uvjeta uz zid, potrebno je definirati ulaz i izlaz difuzora (*Inlet* i *Outlet*), koji su označeni zelenom bojom (Slike 5.7. i 5.8.). Na slici 5.7. prikazan je ulaz u difuzor, kojim je definiran početni uvjet rješavanja jednadžbi kojima će se dobiti simulacija strujanja.



*Slika 5.7. Ulaz difuzora*



*Slika 5.8. Izlaz difuzora*

Slika 5.8. prikazuje izlaz iz difuzora, što dobro pokazuje puno veću površinu poprečnog presjeka izlaza u odnosu na poprečni presjek ulaza u difuzor, što je konstrukcijska ideja ovakvoga difuzora u svrhu povećavanja tlaka, a smanjenja brzine strujanja prema izlazu iz difuzora.

### 5.3. Postavljanje simulacije

Nakon pravilnog odabira numeričke mreže, prije same simulacije potrebno je odabrati postavke s kojima će se računati parametri za simulaciju. Ulazni parametri koji su definirali ovaj zadatak su dva različita volumna protoka kroz difuzor, prvi veličine  $\dot{V}_1 = 4 \text{ m}^3/\text{s}$ , a drugi  $\dot{V}_2 = 8 \text{ m}^3/\text{s}$ . Definirani su tako da je za početni rubni uvjet izabran tzv. *Mass flow inlet*, odnosno ulaz s definiranim masenim protokom.

Uzimajući u obzir gustoću vode od  $\rho = 998,2 \text{ kg/m}^3$ , dobivaju se maseni protoci od:

$$\text{a) } \quad \dot{m}_1 = \dot{V}_1 \cdot \rho = 4 \cdot 998,2 = 3992,8 \text{ kg/s} \quad (5.1)$$

$$\text{b) } \quad \dot{m}_2 = \dot{V}_2 \cdot \rho = 8 \cdot 998,2 = 7985,6 \text{ kg/s} \quad (5.2)$$

Model rješavanja, kojima se definiraju jednačbe i dodatni uvjeti rješavanja, odabire se pri postavljanju, i u ovom slučaju je uzet k-epsilon (k- $\epsilon$ ) model turbulencije, najčešći model koji se koristi u računskoj dinamici fluida (CFD) za simulaciju srednjih karakteristika protoka za uvjete turbulentnog strujanja. To je model s dvije jednačbe koji daje opći opis turbulencije pomoću dviju transportnih jednačbi (parcijalnih diferencijalnih jednačbi). Prva transportirana varijabla je turbulentna kinetička energija (k). Druga transportirana varijabla je brzina disipacije turbulentne kinetičke energije ( $\epsilon$ ).

## 6. REZULTATI

Nakon postavljanja modela i uvjeta simulacije, prelazi se na numeričko rješavanje jednadžbi. Rješavanje je iterativno, i u ovom radu je za oba slučaja odrađeno 725 iteracija jednadžbi.

U nastavku su pokazani rezultati, odnosno veličine brzina, statičkih, dinamičkih i apsolutnih tlakova protoka u oba slučaja ( $\dot{V}_1 = 4 \text{ m}^3/\text{s}$  i  $\dot{V}_2 = 8 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Rezultati su prikazani jedan pokraj drugoga za pojedine veličine, kako bi se vidjele razlike između dva slučaja.

### 6.1.1. Brzina strujanja

Slike 6.1. i 6.2. pokazuju očekivani rezultat simulacije, a to je pad brzine fluida prema izlazu iz difuzora, što je upravo i svrha difuzora. Pokazuje i to da je brzina pri protoku  $\dot{V}_2$  dupla veća od brzine pri protoku  $\dot{V}_1$ , što je logično s obzirom na jednadžbu volumnog protoka fluida u cijevi, i činjenice da je  $\dot{V}_2$  dvostruko veći od  $\dot{V}_1$ :

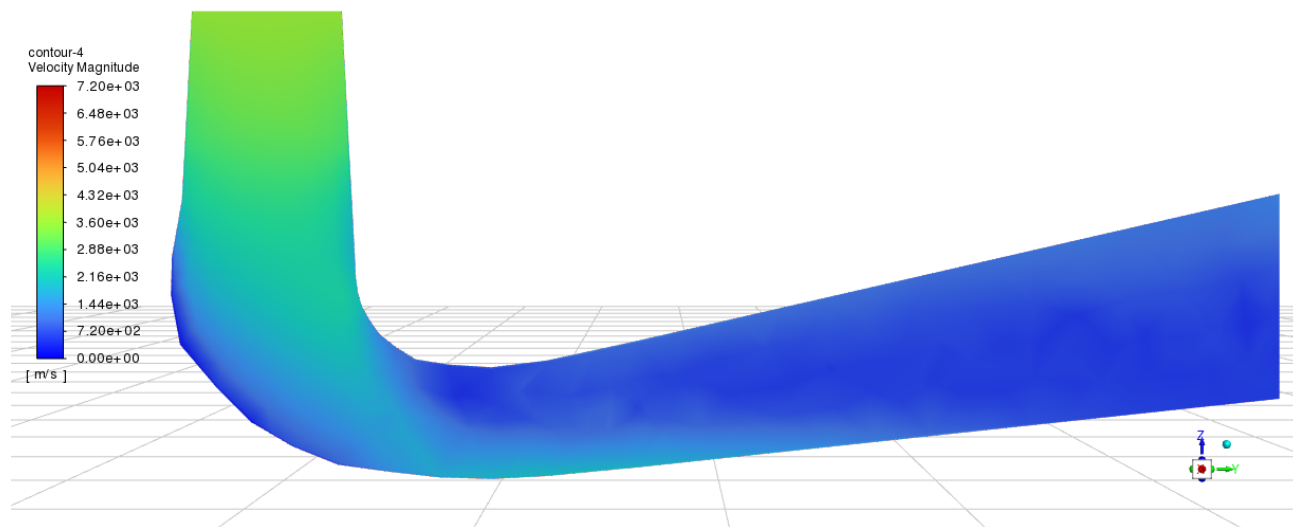
$$\dot{V} = v \cdot A \quad (6.1)$$

gdje je:

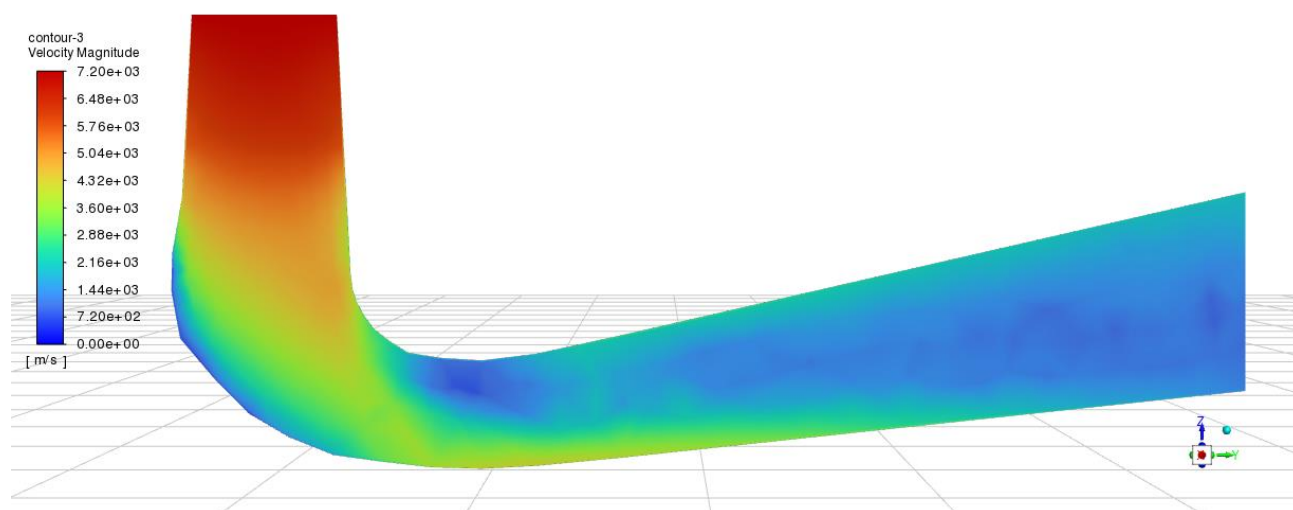
$v$  – brzina strujanja fluida

$A$  – poprečni presjek cijevi.

U oba slučaja je vidljivo kako brzina najviše pada u području koljena, odnosno skretanja toka vode unutar difuzora, i nakon toga više ne dobiva značajno na brzini, zbog širenja poprečnog presjeka prema izlazu iz difuzora.



*Slika 6.1. Brzina strujanja pri  $\dot{V}_1$*



*Slika 6.2.. Brzina strujanja pri  $\dot{V}_2$*

### 6.1.2. Statički tlak

U nastavku su dani rezultati za statičke tlakove pri  $\dot{V}_1$  (Slika 5.11.) i  $\dot{V}_2$  (Slika 5.12.). Rezultati se slažu s Bernoullijevom jednadžbom gibanja fluida, koja, ako se izuzme djelovanje gravitacije, glasi:

$$\rho \cdot v^2 / 2 + p = konst. \quad (6.2)$$

gdje je:

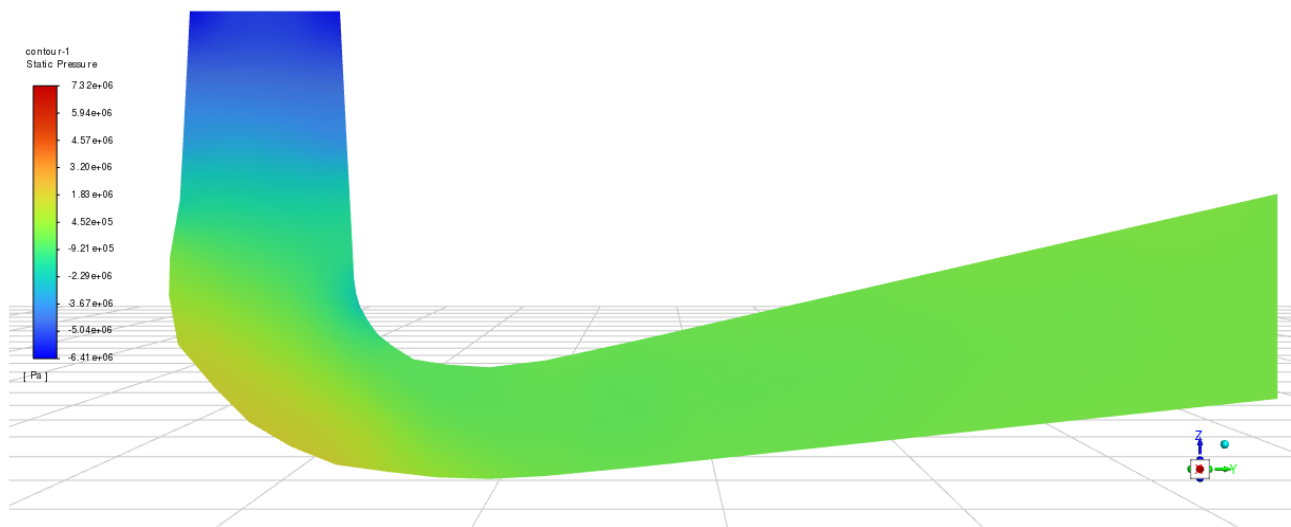
$\rho$  – gustoća fluida, kg/m<sup>3</sup>

$v$  – brzina strujanja fluida, m/s

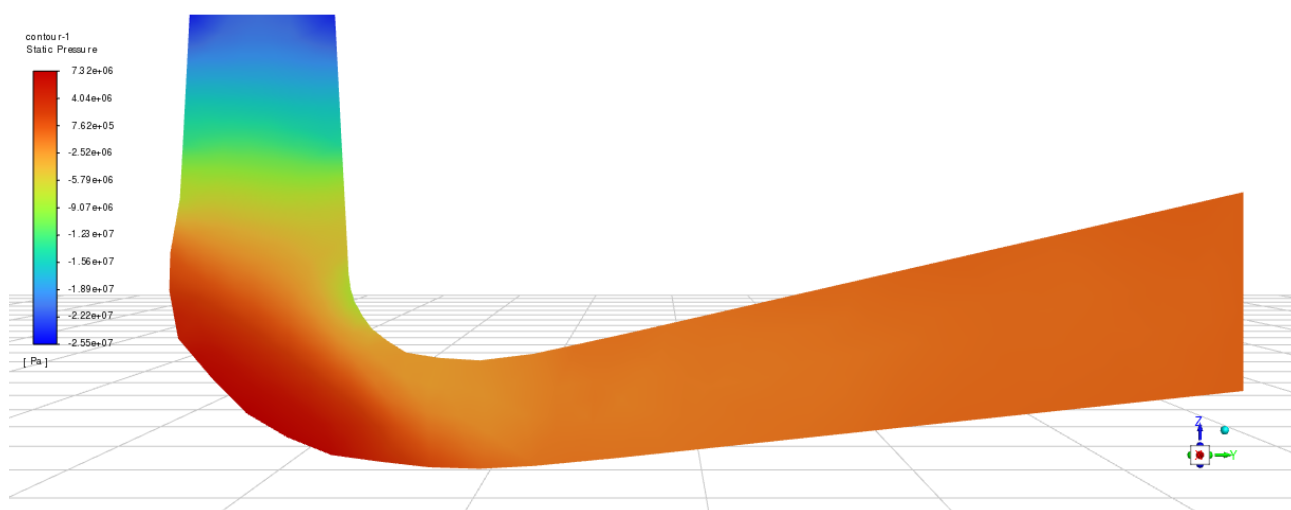
$p$  – statički tlak, Pa.

Uzevši u obzir da je, prema (6.1.), brzina pri protoku  $\dot{V}_2$  duplo veća od brzine pri protoku  $\dot{V}_1$ , očekuje se četiri puta veći statički tlak na izlazu iz difuzora pri protoku  $\dot{V}_2$ , što rezultat pokazuje (Slike 6.3. i 6.4.). Isto tako, očekivano je da će tlakovi biti veći prema izlazu u odnosu prema ulaz u difuzor, što i slike 6.3. i 6.4. pokazuju.





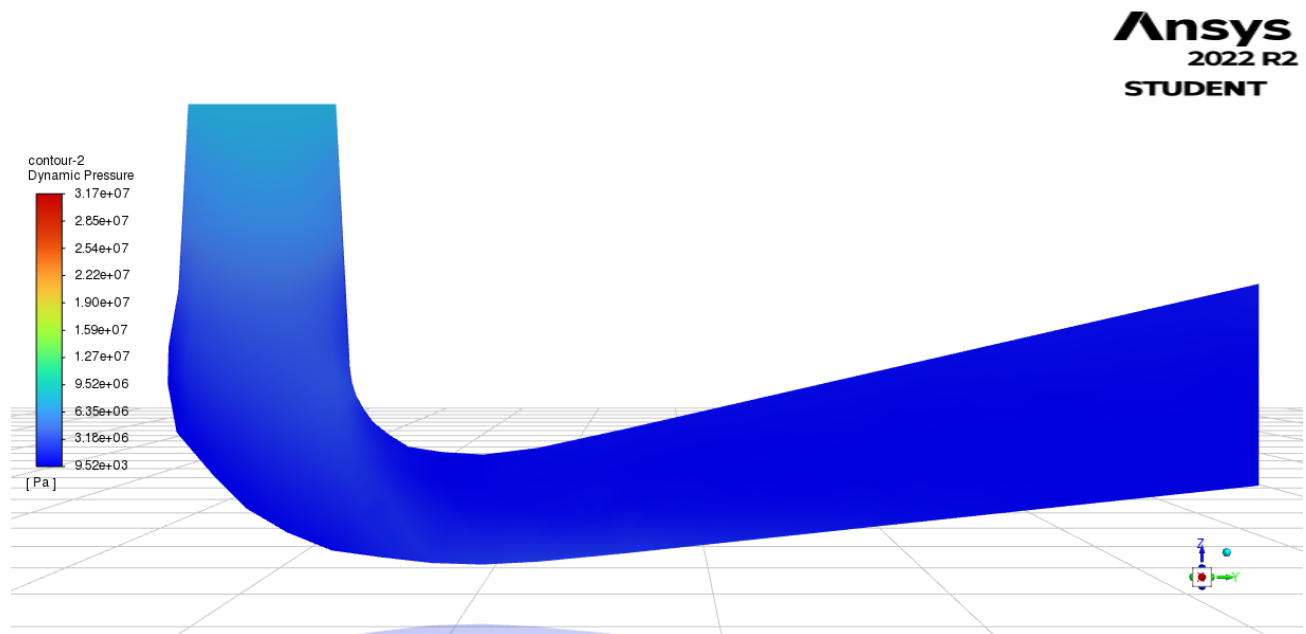
*Slika 6.3. Statički tlak pri  $\dot{V}_1$*



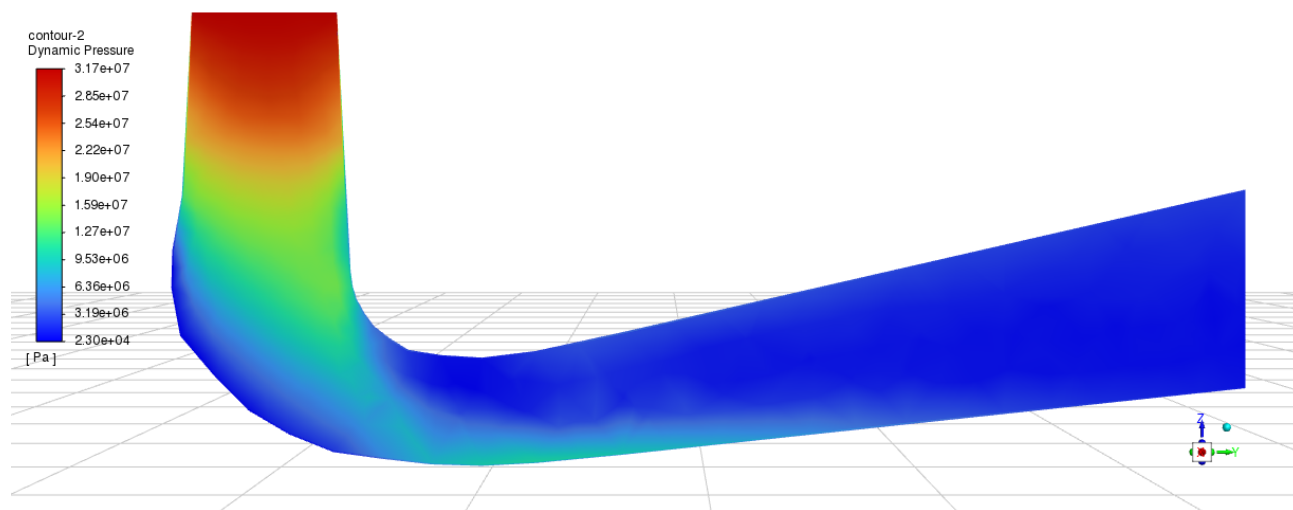
*Slika 6.4. Statički tlak pri  $\dot{V}_2$*

### 6.1.3. Dinamički tlak

Na slikama 6.5. i 6.6. prikazani su dinamički tlakovi u difuzoru pri  $\dot{V}_1$  i  $\dot{V}_2$ . Vidljivo je da je tlak pri duplo manjoj količini strujanja dinamički tlak višestruko manji, što ne čudi s obzirom na parametre strujanja u ova dva slučaja. Ipak na slici 6.6. vidi se da dinamički tlak pada prolazom kroz difuzor.



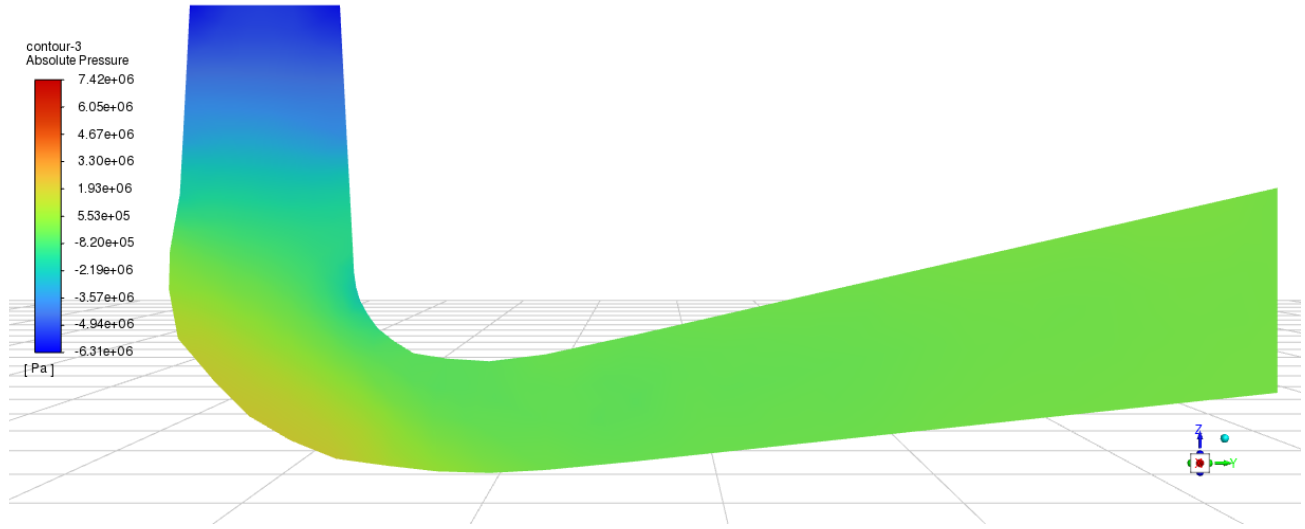
Slika 6.5. Dinamički tlak pri  $\dot{V}_1$



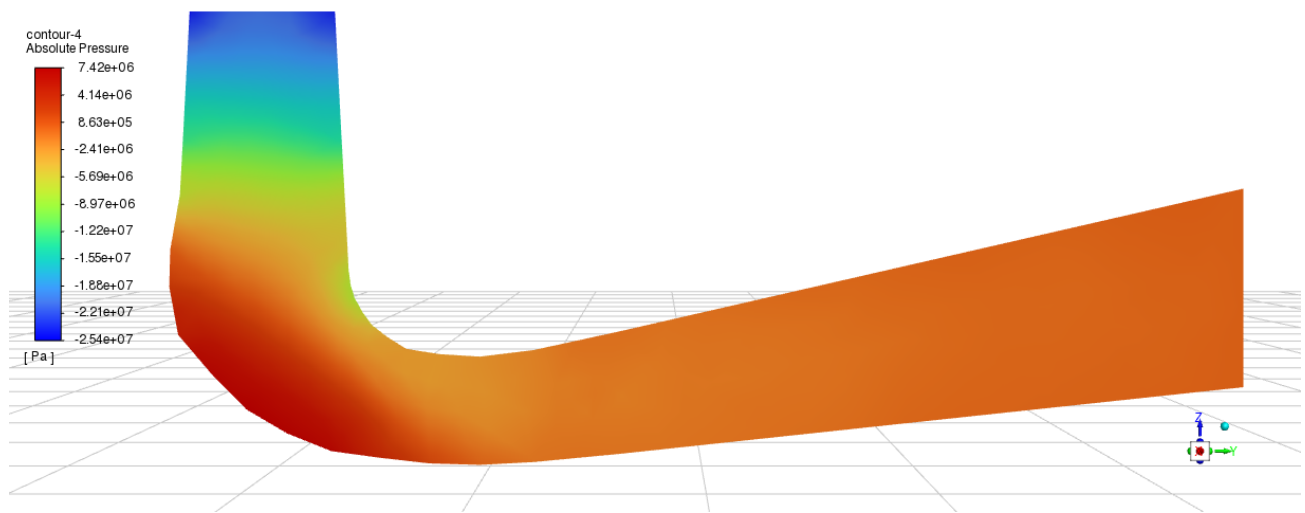
Slika 6.6. Dinamički tlak pri  $\dot{V}_2$

#### 6.1.4. Apsolutni tlak

Iz slika 6.7. i 6.8. vidljivo je da je apsolutni tlak u difuzoru pri strujanju  $\dot{V}_2$  za red veličine veći nego pri duplo manjoj količini protoka  $\dot{V}_1$ . Isto tako, pokazuje se kako u dijelovima difuzora u kojima pada brzina raste tlak i obrnuto, što je za očekivati, te da tlak raste od ulaza prema izlazu, što je konstrukcijska ideja difuzora.



Slika 6.7. Apsolutni tlak pri  $\dot{V}_1$



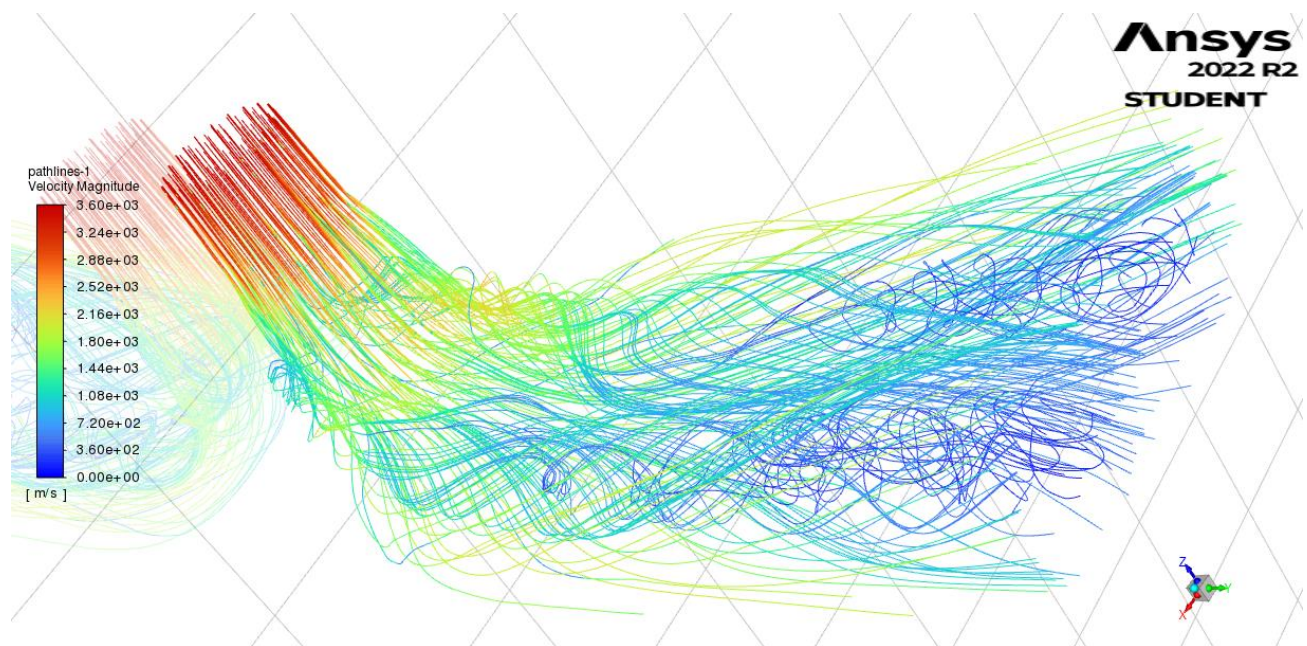
Slika 6.8. Apsolutni tlak za  $\dot{V}_2$

## 6.2. Strujnice

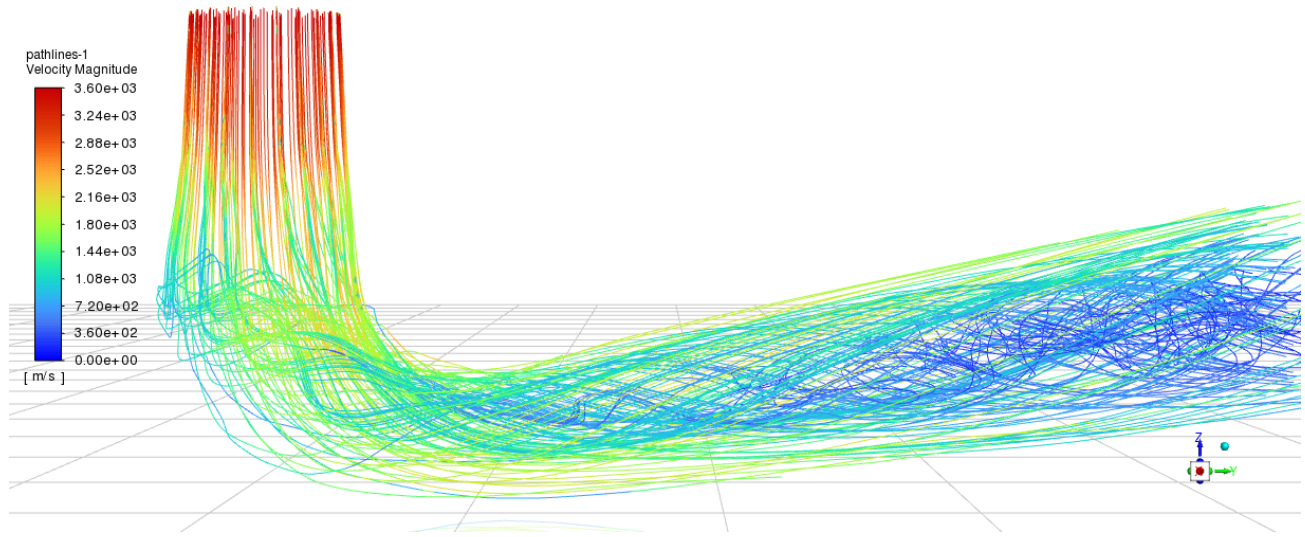
U nastavku su dani prikazi strujnica u oba slučaja kako bi se došlo do zaključaka gdje su zone vrtloga, odnosno najveći gubici u difuzoru.

### 6.2.1. Strujnice pri $V_1$

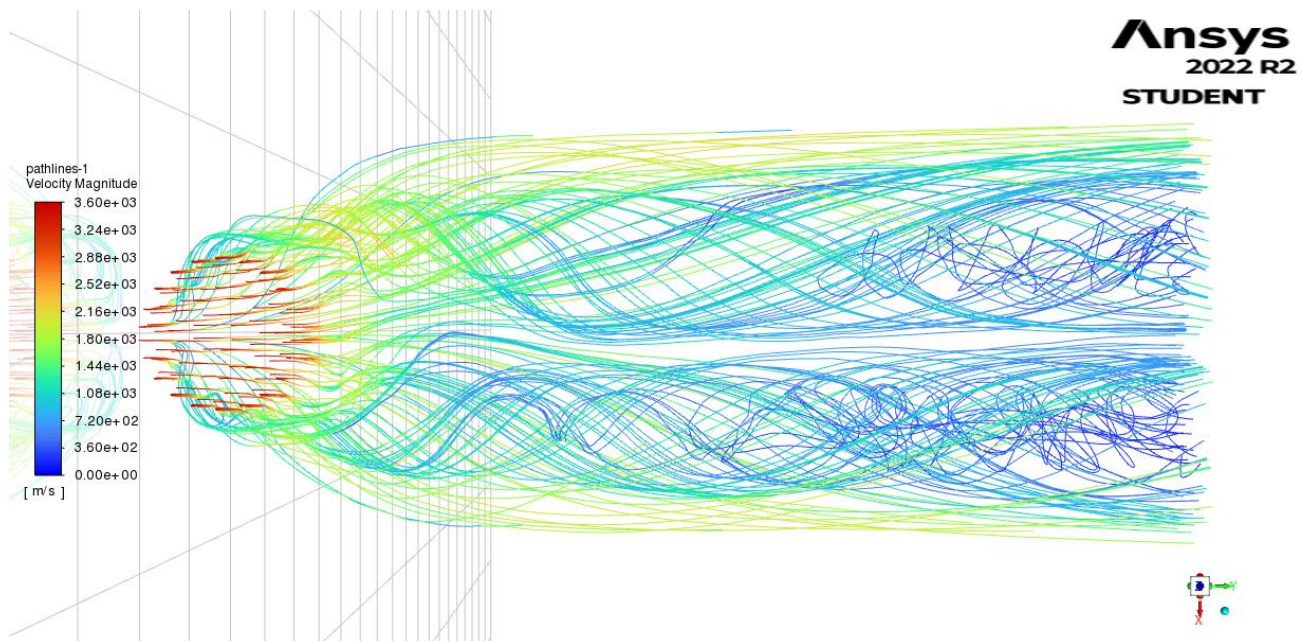
Slike 6.9, 6.10, 6.11. i 6.12. prikazuju strujnice protjecanja fluida kroz difuzor pri  $V_1 = 4 \text{ m/s}$ . Slike dobro prikazuju zone vrtloženja u kojima se stvaraju gubici u strujanju kroz difuzor, koji se nalaze u koljenu difuzora, i u zoni prije izlaza iz difuzora. Vidljivo je i kako se fluid dijeli na dvije zone vrtloga pri izlazu iz difuzora.



Slika 6.9. Izometrijski prikaz kontura strujanja za  $V_1$

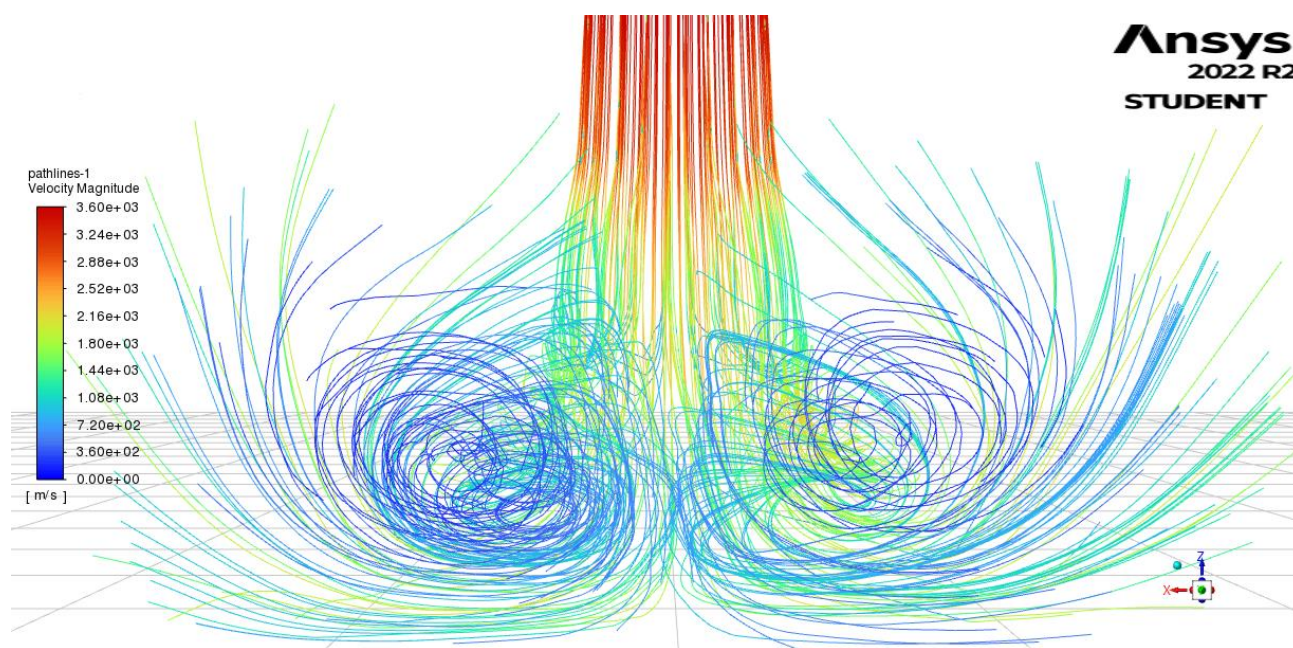


*Slika 6.10. Nacrt kontura strujanja za  $\dot{V}_1$*



*Slika 6.11. Tlocrt kontura strujanja za  $\dot{V}_1$*

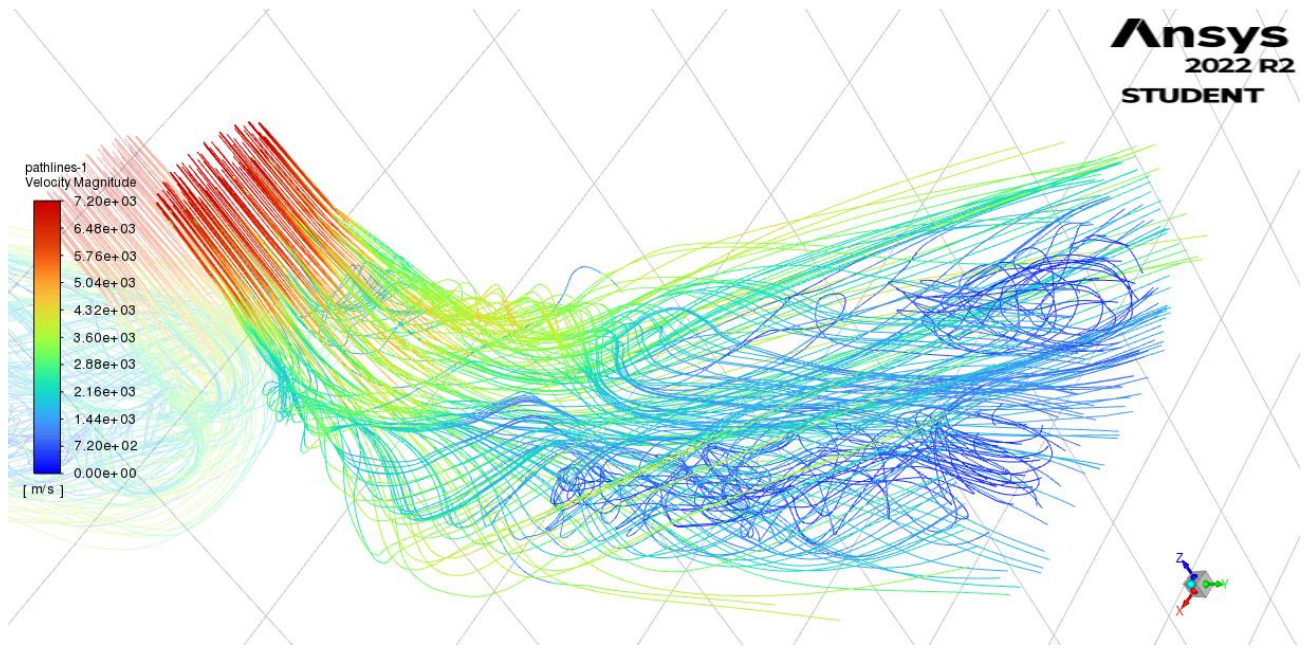




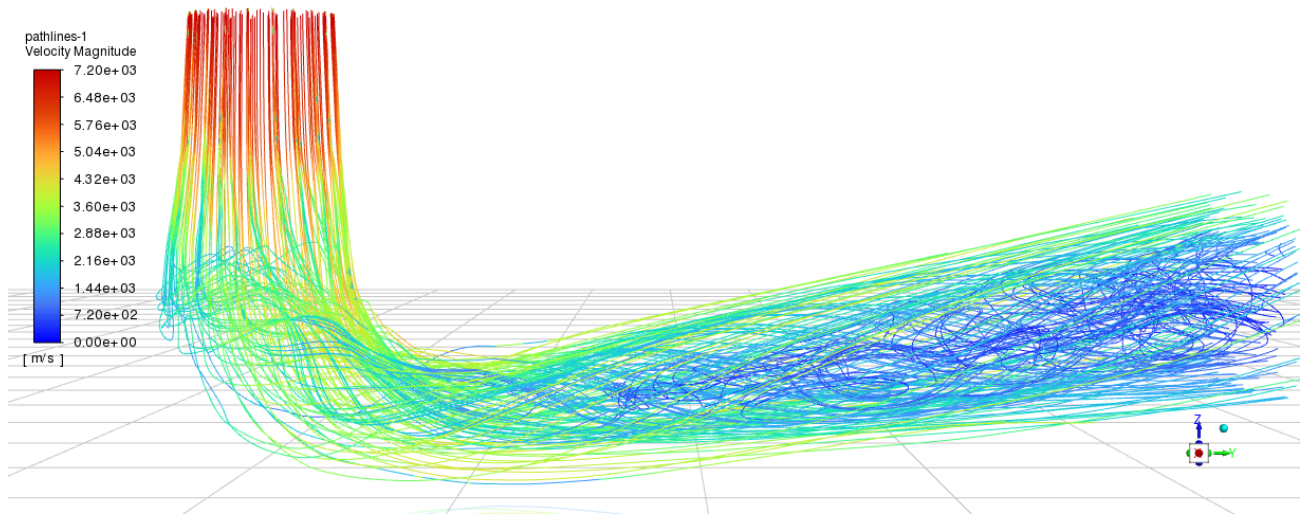
*Slika 6.12. Bokocrt kontura strujanja za  $\dot{V}_1$*

### 6.2.2. Strujnice pri $\dot{V}_2$

Kao i kod primjera pri  $\dot{V}_1$ , strujnice na slikama 6.13., 6.14., 6.15. i 6.16. dobro prikazuju strujanje pri  $\dot{V}_2$ , koje izgleda slično kao i strujanje pri upola manjem volumnom protoku, što pokazuje da se ponašanje fluida ne mijenja previše s porastom protoka u granicama koje su zadane. Brzine su na ulazu dakako dvostruko veće za dvostruko veći protok fluida.

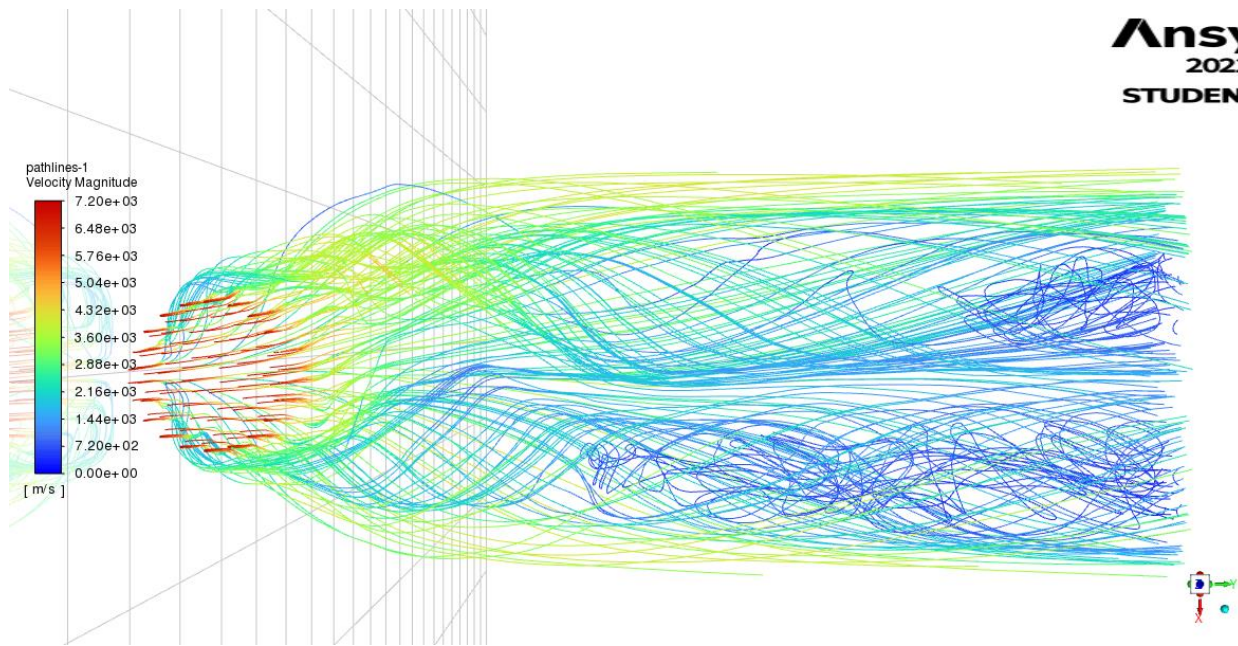


*Slika 6.13. Izometrijski prikaz kontura strujanja za  $\dot{V}_2$*

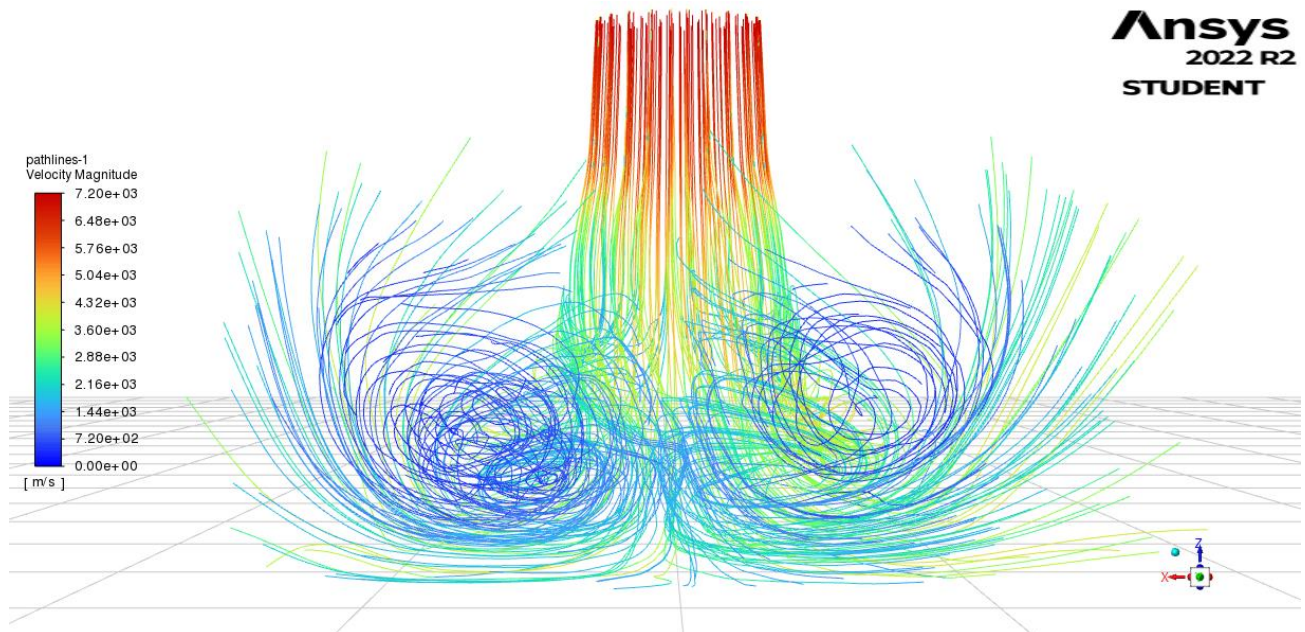


*Slika 6.14. Načrt kontura strujanja za  $\dot{V}_2$*





*Slika 6.15. Tlocrt kontura strujanja za  $V_2$*



*Slika 6.16. Bokocrt kontura strujanja za  $V_2$*

## 7. ZAKLJUČAK

U ovom radu su prikazane osnovne teorijske značajke vodnih turbina i difuzora, koji se najčešće koriste u hidroenergetskim sustavima. Napravljena je analiza strujanja, za dva različita protoka, vode kroz koljenasti difuzor s promjenjivim presjekom Francisove vodne turbine, pomoću Ansysovog Fluent programa za rješavanje numeričkih simulacija. Nakon definicije geometrije i uvjeta strujanja dani su rezultati brzina, statičkih, dinamičkih i apsolutnih tlakova, kao i silnice strujanja, koji prikazuju očekivane rezultate strujanja fluida kroz ovakav difuzor, i daju do znanja u kojim dijelovima difuzora dolazi do najvećih gubitaka. Rezultati pokazuju kako su ovakve numeričke metode izračuna i simulacija vrlo blizu očekivanim teorijskim i eksperimentalnim rezultatima, što pokazuje kako su ovakvi računalni programi dobar alat za predviđanje strujanja, kako bi se napravila analiza geometrije i eventualne preinake u svrhu što boljeg stupnja djelovanja konstrukcijskog rješenja razmatranog strojnog djela.

## 8. LITERATURA

[1] Ujević, L.; Buntić, Z.: "Elektrane", Zagreb, 1993.

[2] s Interneta, [https://www.researchgate.net/figure/The-Fourneyron-turbine-by-1835-the-first-industrial-reaction-turbine-In-the-Fourneyron\\_fig4\\_318502311](https://www.researchgate.net/figure/The-Fourneyron-turbine-by-1835-the-first-industrial-reaction-turbine-In-the-Fourneyron_fig4_318502311)

[3] s Interneta, <https://firmametal.com/pelton-turbun/>

[4] s Interneta, <https://theconstructor.org/practical-guide/francis-turbines-components-application/2900/>

[5] s Interneta, [https://hr.wikipedia.org/wiki/Kaplanova\\_turbina](https://hr.wikipedia.org/wiki/Kaplanova_turbina)

[6] s Interneta, <https://linquip.com/blog/draft-tube/>

[7] Suravarapu, L.; Khare R.: "Study on Effect of Draft Tube Diffuser Shape on Performance of Francis Turbine", referat, s Interneta, 31. svibanj 2021.

[8] Čarija, Z.: "Vodne turbine", radni materijali, Hidraulički strojevi, Tehnički fakultet Rijeka, 2020.

## 9. POPIS SLIKA

|   |    |
|---|----|
| Slika 2.1. Shema Fourneyronove turbine.....           | 3  |
| Slika 2.2. Shema Peltonove turbine.....               | 5  |
| Slika 2.3. Shema Francisove turbine.....              | 6  |
| Slika 2.4. Shema Kaplanove turbine.....               | 7  |
| Slika 2.5. Shema Cijevne turbine.....                 | 8  |
| Slika 3.1. Vrste difuzora.....                        | 9  |
| Slika 5.1. Nacrt geometrije difuzora.....             | 17 |
| Slika 5.2. Tlocrt geometrije difuzora.....            | 17 |
| Slika 5.3. Bokocrt geometrije difuzora.....           | 18 |
| Slika 5.4. Nacrt numeričke mreže.....                 | 19 |
| Slika 5.5. Tlocrt numeričke mreže.....                | 19 |
| Slika 5.6. Prikaz rubnih slojeva numeričke mreže..... | 20 |
| Slika 5.7. Ulaz difuzora.....                         | 21 |
| Slika 5.8. Izlaz difuzora.....                        | 21 |
| Slika 6.1. Brzina strujanja pri $\dot{V}_1$ .....     | 24 |
| Slika 6.2. Brzina strujanja pri $\dot{V}_2$ .....     | 24 |
| Slika 6.3. Statički tlak pri $\dot{V}_1$ .....        | 26 |
| Slika 6.4. Statički tlak pri $\dot{V}_2$ .....        | 26 |
| Slika 6.5. Dinamički tlak pri $\dot{V}_1$ .....       | 27 |
| Slika 6.6. Dinamički tlak pri $\dot{V}_2$ .....       | 28 |
| Slika 6.7. Apsolutni tlak pri $\dot{V}_1$ .....       | 29 |
| Slika 6.8. Apsolutni tlak za $\dot{V}_2$ .....        | 29 |

|  |    |
|--|----|
| Slika 6.9. Izometrijski prikaz kontura strujanja za $\dot{V}_1$ .....  | 30 |
| Slika 6.10. Nacrt kontura strujanja za $\dot{V}_1$ .....               | 31 |
| Slika 6.11. Tlocrt kontura strujanja za $\dot{V}_1$ .....              | 31 |
| Slika 6.12. Bokocrt kontura strujanja za $\dot{V}_1$ .....             | 32 |
| Slika 6.13. Izometrijski prikaz kontura strujanja za $\dot{V}_2$ ..... | 33 |
| Slika 6.14. Nacrt kontura strujanja za $\dot{V}_2$ .....               | 33 |
| Slika 6.15. Tlocrt kontura strujanja za $\dot{V}_2$ .....              | 34 |
| Slika 6.16. Bokocrt kontura strujanja za $\dot{V}_2$ .....             | 34 |

## 10. SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI

U ovome radu se opisuju tipovi vodnih turbina, vrste difuzora, i gubici u hidroenergetskim sustavima, te analizira numerička simulacija protoka fluida kroz difuzor Francisove turbine u dva režima u programu Ansys Fluent, kako bi se došlo do zaključaka o promjenama tokova strujanja i gubitaka kod prostrujavanja vode iz turbine kroz difuzor.

Ključne riječi: vodne turbine, difuzor, Ansys fluent, numerička analiza

## **9. ABSTRACT**

This paper describes the types of water turbines, types of draft tubes, losses in hydropower systems, and analyzes the numerical simulation of fluid flow through the draft tube of a Francis turbine in two regimes, in the Ansys Fluent program, in order to reach conclusions about changes in flow rates and losses at water flow from the turbine through the draft tube.

Keywords: water turbines, draft tube, Ansys fluent, numerical analysis