

# Hidraulička analiza kuglastih zatvarača primjenom Računalne dinamike fluida

---

**Daić, Aleksandra**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2019**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:263744>

*Rights / Prava:* [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-14**



*Repository / Repozitorij:*

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



image not found or type unknown

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
GRAĐEVINSKI FAKULTET U RIJECI**

**Aleksandra Daić**

**HIDRAULIČKA ANALIZA KUGLASTIH ZATVARAČA PRIMJENOM  
RAČUNALNE DINAMIKE FLUIDA**

**Diplomski rad**

**Rijeka, 2019.**

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Diplomski sveučilišni studij Građevinarstvo  
Hidrotehnika  
Vodoopskrba i kondicioniranje voda**

**Aleksandra Daić  
JMBAG: 0114025542**

**HIDRAULIČKA ANALIZA KUGLASTIH ZATVARAČA PRIMJENOM  
RAČUNALNE DINAMIKE FLUIDA**

**Diplomski rad**

**Rijeka, rujan 2019.**



## **IZJAVA**

Diplomski rad izradila sam samostalno, u suradnji s mentorom i uz poštivanje pozitivnih građevinskih propisa i znanstvenih dostignuća iz područja građevinarstva. Građevinski fakultet u Rijeci je nositelj prava intelektualnog vlasništva u odnosu na ovaj rad.

---

Aleksandra Daić

U Rijeci, 16. rujna 2019.

Diplomski rad nastao je kao rezultat rada u okviru projekta

**Razvoj istraživačke infrastrukture na kampusu Sveučilišta u Rijeci**

Voditelj projekta prof. dr. sc. Nevenka Ožanić  
Šifra projekta RC.2.2.06-0001  
Financijer projekta Europski fond za regionalni razvoj (EFRR)  
Ministarstvo znanosti, obrazovanja i sporta RH  
Pravna nadležnost Republika Hrvatska

U Rijeci, 16. rujna 2019.

Mentor:

---

Doc.dr.sc. Elvis Žic, dipl.ing.građ.

## ZAHVALA

*Zahvaljujem prof.dr. Siniši Bikiću, dipl.ing.stro. i prof.dr. Maši Bukurov, dipl.ing.stro. sa Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu, kao i v. prof. dr. Edinu Berberoviću, dipl.ing.stro. sa Strojarskog fakulteta u Zenici na izrazito lijepom i ugodnom prijemu prilikom dolaska u Beč na razmjenu. Njihova predavanja s uvodnog tečaja omogućila su mi razumijevanje osnova računalne dinamike fluida te me dodatno zainteresirala za suštine modeliranja.*

*Sve pohvale, prof.dr. Siniši Bikiću i prof.dr. Maši Bukurov i zbog odlične organizacije Ljetne škole na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu, u periodu od 5. do 10. srpnja 2019. godine. Ljetna mi je škola, uz nova poznanstva i razmjenu znanja s kolegama iz Novoga Sada, omogućila ponavljanje i utvrđivanje naučenoga gradiva s uvodnog tečaja u Beču.*

*Zahvaljujem i profesoru koji je pratio napredovanje moga rada tijekom boravka u Beču, Andreasu Frohneru, dipl.ing., s BOKU Sveučilišta u Beču (University of Natural Resources and Life Sciences Vienna, Department of Material Sciences and Process Engineering). Boravak je organiziran u vidu studentske razmjene sa strane CEEPUS mreže pod nazivom „Building Knowledge and Experience Exchange in CFD (CIII-RS-1012-04-1819)“. Tijekom perioda razmjene, od 1. travnja do 31. svibnja 2019. godine, prof. Frohner pomogao je razriješiti sve probleme na koje sam nailazila prilikom izrade diplomskog rada.*

*Veliko hvala komentoru dr.sc. Luki Lešniku, dipl.ing.stro., postdoktorandu sa Strojarskog fakulteta Sveučilišta u Mariboru. U najvažnijoj, inicijalnoj fazi stvaranja diplomskog rada uvelike je pomogao oko formiranja geometrije modela i učenju osnova rada u Ansys CFX kompjuterskom programu.*

*Posebne zahvale mentoru doc.dr. sc. Elvisu Žicu, dipl.ing.građ. na svesrdnoj pomoći od samog početka rada pa do njegovog dovršetka. Hvala na mnogobrojnim savjetima i pobuđenom zanimanju za navedenu tematiku i rad u potpuno drukčijem programu od dosad korištenih.*

## SAŽETAK

**Naslov rada:** Hidraulička analiza kuglastih zatvarača primjenom Računalne dinamike fluida

**Studentica:** Aleksandra Daić

**Mentor:** Doc.dr.sc. Elvis Žic, dipl.ing.građ.

**Komentor:** dr.sc. Luka Lešnik, dipl.ing.stro.

**Studij:** Diplomski sveučilišni studij Građevinarstvo

**Kolegij:** Vodoopskrba i kondicioniranje voda

Strujanje fluida u cijevnom sustavu moguće je kontrolirati primjenom zatvarača. Mogu se definirati kao vrsta uređaja u sustavu koji se koriste za pokretanje/zaustavljanje, kontrolu ili usmjerenje fluida. Kuglaste zatvarače možemo opisati kao tip zatvarača koji za kontrolu protoka koriste kuglu koja se rotira.

U radu se analizira protok fluida kroz kuglasti zatvarač kao dio cijevnog vodoopskrbnog sustava. Strujanje može biti opisano kao turbulentno koje uzrokuje pojavu vrtloga. Oni se smatraju nepovoljnom pojavom u vodoopskrbnom sustavu, sa mogućnošću uzrokovanja oštećenja zatvarača ili cijevi. Mjerenjem određenih veličina moguće je detektirati područje na kojem će doći do njihove pojave.

Cilj ovoga rada je na temelju dobivenih veličina odrediti prethodno spomenuto područje. U tu svrhu se koriste principi Računalne dinamike fluida (*eng. Computational Fluid Dynamics, CFD*), koja podrazumijeva modeliranje i numeričke metode. CFD kvantitativno predviđa što će se dogoditi prilikom protjecanja određenog fluida. Hidrauličke analize u ovome radu su provedene u Ansys CFX 19.1 kompjuterskom programu, koji koristi Navier-Stokesove jednačbe, Metodu konačnih volumena i  $k-\epsilon$  model turbulencije kao temelj numeričkog modeliranja.

Provedene su četiri različite varijante, ovisno o promjeni geometrije (promjer cijevi), kutu rotacije kuglastog zatvarača i vrijednosti ulazne brzine. Dobiveni rezultati prikazani su promjenama sljedećih fizikalnih veličina: brzina, relativni i ukupni tlak, vrtložna viskoznost i



kinetička energija turbulencije. Uspoređivanje ovih rezultata daje nam uvid u formiranje vrtloga i njihove moguće efekte na cijevni vodoopskrbni sustav.

**Ključne riječi:** Ansys CFX kompjuterski program, kuglasti zatvarač, vrtlozi, turbulentno strujanje,  $k-\varepsilon$  turbulentni model, numeričko modeliranje, hidraulička analiza

## **ABSTRACT**

**Thesis title:** Hydraulic analysis of ball valves using Computational Fluid Dynamics

**Student:** Aleksandra Daić

**Supervisor:** Assistant Professor Elvis Žic, Ph.D. C.E.

**Co-supervisor:** Luka Lešnik, Ph.D. C.E.

**Study:** Graduate study of Civil engineering

**Course:** Water supply and water conditioning system

Fluid flow in piping system it's possible to control using valves. They are components in system that are used to start/stop, control or direct fluid. Ball valves can be described as type of valves that use a perforated rotary ball in order to control the flow.

This graduate thesis analyzes the fluid flow through a ball valve that is part of water supply piping system. Fluid flow can be described as turbulent flow which causes the appearance of vortices. They are considered as harmful occurrence in the water supply system, which can cause the damage of valve or pipe. By measuring certain quantities, it is possible to detect the area of vortice's appearance.

The aim of this graduate thesis is to determine the previous mentioned area, based on obtained values. For that purpose, the principles of Computational Fluid Dynamics can be used, which consider modeling and numerical methods. CFD is quantitatively predicting what will happen when certain fluid flows. This paper's hydraulic analysis is performed in Ansys CFX 19.1 computer program, which uses Navier-Stokes equations, Finite Volume Method and  $k-\varepsilon$  turbulence model as the basis of numerical modeling. There are four different variants implemented, depending on change in geometry (pipe diameter), ball valve rotation angle and inlet velocity value. The obtained results show changes in the following physical quantities: velocity, relative and total pressure, eddy viscosity and turbulence kinetic energy. Comparing those results gives us an insight into the vortices formation and it's possible effects on piping system.

**Key words:** Ansys CFX computer program, ball valve, vortices, turbulent flow,  $k-\varepsilon$  turbulent model, numerical modeling, hydraulic analysis

# SADRŽAJ

POPIS SLIKA .....	1
POPIS TABLICA .....	5
1. UVOD .....	6
2. OSNOVNE ZNAČAJKE ZATVARAČA .....	8
2.1. Općenito o zatvaračima .....	8
2.2. Rad kuglastih zatvarača.....	14
2.3. Podjela kuglastih zatvarača.....	17
2.3.1. Kapacitet .....	17
2.3.2. Dizajn.....	20
2.3.3. Materijal.....	24
2.3.4. Način montaže.....	27
2.4. Određivanje brzina i protoka na kuglastim zatvaračima .....	29
3. PRIMJENA ANSYS WORKBENCH PROGRAMSKOG PAKETA .....	33
3.1. Računalna dinamika fluida .....	33
3.2. Ansys CFX kompjuterski program .....	35
3.3. Turbulencija i $k-\varepsilon$ turbulentni model .....	37
3.4. Navier-Stokesove jednačbe .....	42
3.5. Metoda konačnih volumena (MKV) .....	42
4. NUMERIČKI MODEL ZA HIDRAULIČKU ANALIZU OPSTRUJAVANJA FLUIDA OKO KUGLASTOG ZATVARAČA.....	44
5. HIDRAULIČKA ANALIZA I REZULTATI ISTRAŽIVANJA.....	51
5.1. Prva varijanta hidrauličkog proračuna.....	51
5.1.1. Brzina toka fluida.....	52

5.1.2. Relativni i ukupni tlak.....	63
5.1.3. Vrtložna viskoznost (eng. Eddy Viscosity).....	69
5.1.4. Kinetička energija turbulencije (eng. Turbulence Kinetic Energy).....	73
5.2. Druga varijanta hidrauličkog proračuna.....	76
5.2.1. Brzina toka u smjeru centralne horizontalne osi.....	76
5.2.2. Relativni i ukupni tlak.....	78
5.2.3. Vrtložna viskoznost (eng. Eddy Viscosity).....	83
5.2.4. Kinetička energija turbulencije (eng. Turbulence Kinetic Energy).....	86
5.3. Treća varijanta hidrauličkog proračuna.....	90
5.3.1. Varijanta sa promjerom cijevi D=100 mm.....	90
5.3.2. Varijanta sa promjerom cijevi D=150 mm.....	105
6. ZAKLJUČAK.....	128
7. LITERATURA.....	132

## POPIS SLIKA

Slika 2.1. Eliptični zasun [10] .....	9
Slika 2.2. Leptirasti zasun [10] .....	9
Slika 2.3. Ovalni zasun [10] .....	10
Slika 2.4. Leptirasti ventil [3] .....	10
Slika 2.5. Kuglasti ventil [4] .....	11
Slika 2.6. Presjeci zatvarača sa osnovnim dijelovima i pozicijama rotacije [6] .....	14
Slika 2.7. Pneumatski pogonjen kuglasti zatvarač [8] .....	15
Slika 2.8. Električno pogonjen kuglasti zatvarač [8] .....	16
Slika 2.9. Kuglasti zatvarač sa punim provrtom [9] .....	17
Slika 2.10. Kuglasti zatvarač sa reduciranim provrtom [9] .....	18
Slika 2.11. Kuglasti zatvarač sa „V“ otvorom [9] .....	19
Slika 2.12. Mehanički učvršćen kuglasti zatvarač [9] .....	20
Slika 2.13. Jednodijelni kuglasti zatvarač [10] .....	21
Slika 2.14. Dvodijelni kuglasti zatvarač [10] .....	22
Slika 2.15. Trodijelni kuglasti zatvarač [11] .....	23
Slika 2.16. Načini montaže kuglastih zatvarača [9] .....	24
Slika 2.17. Brončani kuglasti zatvarač [12] .....	25
Slika 2.18. Čelični trodijelni kuglasti zatvarač [12] .....	25
Slika 2.19. PVC kuglasti zatvarač [12] .....	26
Slika 2.20. Kuglasti zatvarač sa zavarenim krajevima [14] .....	27
Slika 2.21. Kuglasti zatvarač montiran navojnom vezom [14] .....	28
Slika 2.22. Kuglasti zatvarač sa priključkom prirubnice [14] .....	28
Slika 2.23. Strujanje fluida i princip mjerenja brzina i protoka [15] .....	30
Slika 2.24. Shema prijenosa signala sa magnetskog mjerača protoka [15].....	30
Slika 2.25. Princip rada mehaničkog mjerača protoka [15] .....	31
Slika 2.26. Parametri koji utječu na mjerenje [15] .....	31
Slika 2.27. Princip rada vrtložnog mjerača protoka [15] .....	32

Slika 3.1. Proces provođenja simulacije u CFD [16] .....	33
Slika 3.2. Prikaz opstrujavanja oko tijela oblika kruga i automobila [21] .....	37
Slika 3.3. Vrijednost brzine u poprečnom presjeku cijevi, a) laminarno strujanje b) turbulentno strujanje [21] .....	39
Slika 3.4. Simulacija turbulentnog (kaotičnog) strujanja [23] .....	39
Slika 3.5. Prikaz definiranja mreže i čvorova [23] .....	43
Slika 4.1. Izgenerirana numerička mreža na kontaktu zatvarač-cijev .....	47
Slika 4.2. Definirani rubni uvjeti u numeričkom modelu kuglastog zatvarača .....	48
Slika 4.3. Iterativni proces obrade podataka i konvergencija rješenja za numerički model .....	49
Slika 5.1. a.-d. Promjene brzine $v$ duž horizontalnih i vertikalnih ravnina za slučaj rotacije zatvarača za $15^\circ$ u odnosu na vertikalnu os .....	52
Slika 5.2. a.-d. Promjene brzine $v$ duž horizontalnih i vertikalnih ravnina za slučaj rotacije zatvarača za $30^\circ$ u odnosu na vertikalnu os .....	55
Slika 5.3. a.-d. Promjene brzine $v$ duž horizontalnih i vertikalnih ravnina za slučaj rotacije zatvarača za $45^\circ$ u odnosu na vertikalnu os .....	57
Slika 5.4. a.-d. Promjene brzine $v$ duž horizontalnih i vertikalnih ravnina za slučaj rotacije zatvarača za $60^\circ$ u odnosu na vertikalnu os .....	59
Slika 5.5. a.-d. Promjene brzine $v$ duž horizontalnih i vertikalnih ravnina za slučaj rotacije zatvarača za $75^\circ$ u odnosu na vertikalnu os .....	61
Slika 5.6. a.-b. Promjene relativnog i ukupnog tlaka duž horizontalne ravnine za slučaj rotacije zatvarača za $15^\circ$ u odnosu na vertikalnu os .....	64
Slika 5.7. a.-b. Promjene relativnog $p$ i ukupnog tlaka $p_t$ duž horizontalne ravnine za slučaj rotacije zatvarača za $30^\circ$ u odnosu na vertikalnu os .....	65
Slika 5.8. a.-b. Promjene relativnog $p$ i ukupnog tlaka $p_t$ duž horizontalne ravnine za slučaj rotacije zatvarača za $45^\circ$ u odnosu na vertikalnu os .....	66
Slika 5.9. a.-b. Promjene relativnog $p$ i ukupnog tlaka $p_t$ duž horizontalne ravnine za slučaj rotacije zatvarača za $60^\circ$ u odnosu na vertikalnu os .....	67
Slika 5.10. a.-b. Promjene relativnog $p$ i ukupnog tlaka $p_t$ duž horizontalne ravnine za slučaj rotacije zatvarača za $75^\circ$ u odnosu na vertikalnu os .....	68
Slika 5.11. a.-e. Promjene vrtložne viskoznosti $\nu_t$ duž horizontalnih ravnina – Varijanta 1 .....	70
Slika 5.12. a.-e. Promjene kinetičke energije turbulencije $k$ duž horizontalnih ravnina u odnosu na kut rotacije oko vertikalne osi – Varijanta 1 .....	73

Slika 5.13. a.-c. Promjene brzine $v$ uzduž toka duž horizontalnih ravnina .....	77
Slika 5.14. a.-b. Promjene relativnog $p$ i ukupnog tlaka $p_t$ duž horizontalnih ravnina .....	79
Slika 5.15. a.-b. Promjene relativnog $p$ i ukupnog tlaka $p_t$ duž horizontalnih ravnina .....	80
Slika 5.16. a.-b. Promjene relativnog $p$ i ukupnog tlaka $p_t$ duž horizontalnih ravnina .....	81
Slika 5.17. Promjena relativnog tlaka $p$ u sustavu za tri različite brzine toka .....	82
Slika 5.18. a.-c. Promjene vrtložne viskoznosti $\nu_t$ duž horizontalnih ravnina pri različitim brzinama toka .....	83
Slika 5.19. Promjena vrtložne viskoznosti $\nu_t$ u sustavu za tri različite brzine toka .....	85
Slika 5.20. a.-c. Promjene kinetičke energije turbulencije $k$ duž horizontalnih ravnina pri različitim brzinama toka .....	86
Slika 5.21. Promjena kinetičke energije turbulencije $k$ u sustavu za tri različite brzine toka .....	88
Slika 5.22. Vektorski prikaz promjene brzine toka pri brzini od 2,0 m/s .....	89
Slika 5.23. Područje strujanja vode u suprotnom smjeru - formiranje vrtloga .....	89
Slika 5.24. a.-e. Promjene brzine toka $v$ duž horizontalnih ravnina u odnosu na vertikalnu os rotacije .....	91
Slika 5.25. a.-b. Promjene relativnog $p$ i ukupnog tlaka $p_t$ duž horizontalnih ravnina – kut rotacije $15^\circ$ .....	94
Slika 5.26. a.-b. Promjene relativnog $p$ i ukupnog tlaka $p_t$ duž horizontalnih ravnina – kut rotacije $30^\circ$ .....	95
Slika 5.27. a.-b. Promjene relativnog $p$ i ukupnog tlaka $p_t$ duž horizontalnih ravnina – kut rotacije $45^\circ$ .....	96
Slika 5.28. a.-b. Promjene relativnog $p$ i ukupnog tlaka $p_t$ duž horizontalnih ravnina – kut rotacije $60^\circ$ .....	97
Slika 5.29. a.-b. Promjene relativnog $p$ i ukupnog tlaka $p_t$ duž horizontalnih ravnina – kut rotacije $75^\circ$ .....	98
Slika 5.30. a.-e. Promjene vrtložne viskoznosti $\nu_t$ duž horizontalnih ravnina pri različitim kutevima rotacije u odnosu na vertikalnu os .....	99
Slika 5.31. a.-e. Promjene kinetičke energije turbulencije $k$ duž horizontalnih ravnina pri različitim kutevima rotacije u odnosu na vertikalnu os .....	102
Slika 5.32. a.-e. Promjene brzine toka $v$ duž horizontalnih ravnina pri različitim kutevima u odnosu na vertikalnu os rotacije .....	106

Aleksandra Daić, Hidraulička analiza kuglastih zatvarača primjenom Računalne dinamike fluida, Diplomski rad

Slika 5.33. a.-b. Promjene relativnog $p$ i ukupnog tlaka $p_t$ duž horizontalnih ravnina – kut rotacije $15^\circ$ .....	109
Slika 5.34. a.-b. Promjene relativnog $p$ i ukupnog tlaka $p_t$ duž horizontalnih ravnina – kut rotacije $30^\circ$ .....	110
Slika 5.35. a.-b. Promjene relativnog $p$ i ukupnog tlaka $p_t$ duž horizontalnih ravnina – kut rotacije $45^\circ$ .....	111
Slika 5.36. a.-b. Promjene relativnog $p$ i ukupnog tlaka $p_t$ duž horizontalnih ravnina – kut rotacije $60^\circ$ .....	112
Slika 5.37. a.-b. Promjene relativnog $p$ i ukupnog tlaka $p_t$ duž horizontalnih ravnina – kut rotacije $75^\circ$ .....	113
Slika 5.38. a.-e. Promjene vrtložne viskoznosti $\nu_t$ duž horizontalnih ravnina pri različitim kutevima rotacije u odnosu na vertikalnu os .....	114
Slika 5.39. a.-e. Promjene kinetičke energije turbulencije $k$ duž horizontalnih ravnina pri različitim kutevima rotacije u odnosu na vertikalnu os .....	117
Slika 5.40. Vektorski prikaz područja maksimalnih brzina toka (kut rotacije $15^\circ$ ) .....	121
Slika 5.41. Vektorski prikaz promjene brzine toka za rotaciju zatvarača od $75^\circ$ .....	121
Slika 5.42. Grafički prikaz promjene brzine toka za otvorenost zatvarača od $15^\circ$ i $75^\circ$ .....	122
Slika 5.43. Vektorski prikaz promjene tlaka pri opstrujavanju vode (kut rotacije $15^\circ$ ) .....	123
Slika 5.44. Vektorski prikaz promjene tlaka uslijed opstrujavanja vode (kut rotacije $75^\circ$ ) .....	124
Slika 5.45. a.-b. Promjena relativnog tlaka u sustavu za tri varijante geometrije sustava (otvorenost za $15^\circ$ i $75^\circ$ ) .....	125
Slika 5.46. Promjena vrtložne viskoznosti $\nu_t$ u sustavu za tri varijante geometrije cijevnog sustava (kut rotacije $75^\circ$ ) .....	126
Slika 5.47. Promjena kinetičke energije turbulencije $k$ u sustavu za tri varijante geometrije cijevnog sustava (kut rotacije $75^\circ$ ) .....	127
Slika 6.1. Promjena brzine i vrtložne viskoznosti ovisno o promjeni geometrije cijevnog sustava (Varijante 1, 3.1 i 3.2) .....	128
Slika 6.2. Promjena brzine i vrtložne viskoznosti ovisno o promjeni ulazne brzine toka (Varijanta 2) .....	130



## POPIS TABLICA

Tablica 5.1. Ulazni parametri za provedene varijante hidrauličkog proračuna .....	51
Tablica 6.1. Vrijednosti brzine i vrtložne viskoznosti ovisno o promjeni geometrije cijevnog sustava .....	129
Tablica 6.2. Vrijednosti brzine i vrtložne viskoznosti ovisno o promjeni ulazne brzine toka .....	130

## 1. UVOD

Vodopostrobnna mreža je složen sustav sastavljen od niza elemenata čije zajedničko funkcioniranje rezultira distribucijom vode korisnicima. Budući da zahtjevi potrošača nisu uvijek jednaki, u posljednje vrijeme dolazi do sve veće potrebe za fleksibilnosti u dostavi količine vode. Primjerice, rad određenih industrija povremeno zahtijeva smanjeni ili povećani dotok vode. Kako bi se to osiguralo potrebno je, uz pažljivo dimenzioniranje kompletnog vodopostrobnog sustava, osigurati elemente koji će omogućiti regulaciju dotoka fluida. Upravo tome služe zatvarači.

U ovome radu analizira se protok fluida, konkretno vode, kroz sustav cijevi spojen kuglastim zatvaračem. Protok fluida različitih vrijednosti i smjera djelovanja definira nastanak vrtloga, koji su nepoželjna pojava. Mjerenjem vrijednosti fizikalnih veličina (brzina, relativni i ukupni tlak, vrtložna viskoznost, kinetička energija turbulencije, dinamička viskoznost, tangencijalna naprezanja i dr.) dobiva se uvid o postojanju vrtloga i njihovoj koncentraciji na određenom području (u određenom dijelu) cijevi. Pravodobnom detekcijom moguće je spriječiti ili minimalizirati utjecaj njihovog djelovanja, što se ujedno i želi prikazati ovim radom. Za tu se svrhu koristi programski paket Ansys Workbench koji primjenjuje računalnu dinamiku fluida (*eng. Computational Fluid Dynamics, CFD*). U sklopu ovoga paketa postoji kompjuterski program Ansys CFX 19.1, u kojemu su provedene simulacije. Numerička obrada (analiza) se temelji na Navier-Stokesovim jednadžbama i metodi konačnih volumena, primijenjujući  $k-\varepsilon$  model turbulencije i Upwind shemu za diskretizaciju sustava. Cijeli proces se temelji na generiranju numeričke mreže u kompletnom promatranom sustavu (domeni), definiranjem čvorova u svakoj ćeliji (konačnom volumenu), te postavljanja parcijalnih diferencijalnih jednadžbi za svaki čvor. Pretvorbom parcijalnih jednadžbi u algebarske, dobiva se njihovo rješenje koje predstavlja vrijednost određene fizikalne veličine u čvoru ćelije.

U posljednjih nekoliko desetljeća, zahvaljujući razvitku računalne tehnologije, došlo je do porasta u provođenju inženjerskih simulacija. Upravo tome služi Ansys Workbench programski paket koji ima široku primjenu u brojnim tehnološkim procesima: automobilskoj i zrakoplovnoj industriji, računalnoj tehnologiji, graditeljstvu, pa čak i svemirskim istraživanjima. Korištenje takvog programa omogućuje predikciju ponašanja

fluida u sustavu te dimenzioniranje sustava na najkvalitetniji i najsigurniji način za korisnike.

Rad započinje teorijskim dijelom sa blagim prijelazom prema numeričkoj obradi, odnosno hidrauličkoj (hidrodinamičkoj) analizi modela.

Drugo poglavlje obuhvaća osnovne značajke zatvarača, gdje su na početku definirani osnovni pojmovi i pojašnjena njihova uloga u vodoopskrbnom sustavu. Dalje se nastavlja njihovom podjelom s obzirom na kapacitet, dizajn, vrstu materijala i način montaže. Zaključno je rečeno nešto o određivanju brzina toka i protoka na kuglastim zatvaračima.

Sljedeće poglavlje obuhvaća osnove o Ansys CFX 19.1 kompjuterskom programu, s obzirom da se hidraulička analiza vrši u istom. Uvodno je rečeno nešto o računalnoj dinamici fluida, a poglavlje je zaokruženo pojašnjenjem pojmova koji predstavljaju temelj modeliranja: turbulencija,  $k-\varepsilon$  model turbulencije, Navier-Stokesove jednačbe i metoda konačnih volumena.

U četvrtom poglavlju su detaljno opisane faze modeliranja u Ansys CFX kompjuterskom programu. Zapčinje se izradom geometrije 3D modela i problemima na koje se je u ovoj fazi naišlo. Potom slijedi generiranje numeričke mreže uz neophodno definiranje granica domene. Potrebno je definirati i određene fizikalne parametre koji su detaljno opisani u samom poglavlju, a sve to kao uvjet za pokretanje simulacije.

Dobiveni rezultati prikazani su u petom poglavlju, podijeljeni u četiri varijante, ovisno o promjeni geometrije, kuta rotacije zatvarača ili vrijednosti ulazne brzine toka. Rezultati su pretežito prikazani ravninama definiranim uzduž sustava. Grafičkim prikazima na kraju poglavlja uspoređuju se vrijednosti fizikalnih veličina ovisno o pojedinoj varijanti, na temelju kojih se dolazi do određenih zaključaka.

Kao suma na kompletnu hidrauličku analizu i dobivene rezultate, odabrane su dvije fizikalne veličine (brzina toka i vrtložna viskoznost) kojima je dan prikaz za različite varijante, kao potvrda na dobivene rezultate u petom poglavlju.

## 2. OSNOVNE ZNAČAJKE ZATVARAČA

### 2.1. Općenito o zatvaračima

Opće je poznato kako vodoopskrbnu mrežu osim cjevovoda i fazonskih komada čini i vodovodna armatura, čija je funkcija da omogući ispravno funkcioniranje, upravljanje i održavanje vodoopskrbne mreže [10]. Ovisno o namjeni, vodovodnu armaturu je moguće podijeliti na:

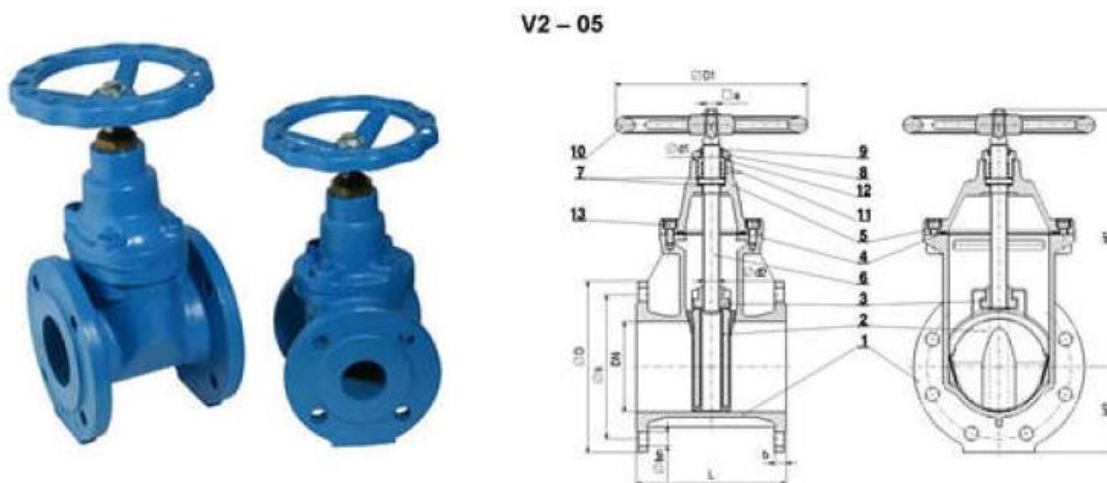
- uređaje za zatvaranje i regulaciju,
- uređaje za uzimanje vode,
- mjerne uređaje, te
- zaštitne uređaje [10].

U ovome su diplomskom radu od najvećeg interesa uređaji za zatvaranje i regulaciju, stoga će u nastavku biti riječi o njima.

Zatvarače je moguće definirati kao vrstu upravljačkih i zapornih uređaja smještenih na cjevovodima koji prenose tekućinu i plin [7]. U vodoopskrbnoj mreži služe za djelomičan ili potpun prekid protjecanja vode. Postavljaju se na svim grananjima, te na ravnim dionicama na razmaku 300 – 500 m [10]. Ovisno o nazivnom promjeru (DN) i načinu brtvljenja moguće ih je podijeliti na:

- zasune
  - nazivni promjer DN > cca 75 mm
  - postepeno zatvaranje
  - materijal: lijevano željezo (duktilno)
  - metal na metal
- ventile
  - nazivni promjer DN < cca 75 mm
  - naglo zatvaranje
  - materijal: mesing, bronca, plastične mase
  - gumena brtva.

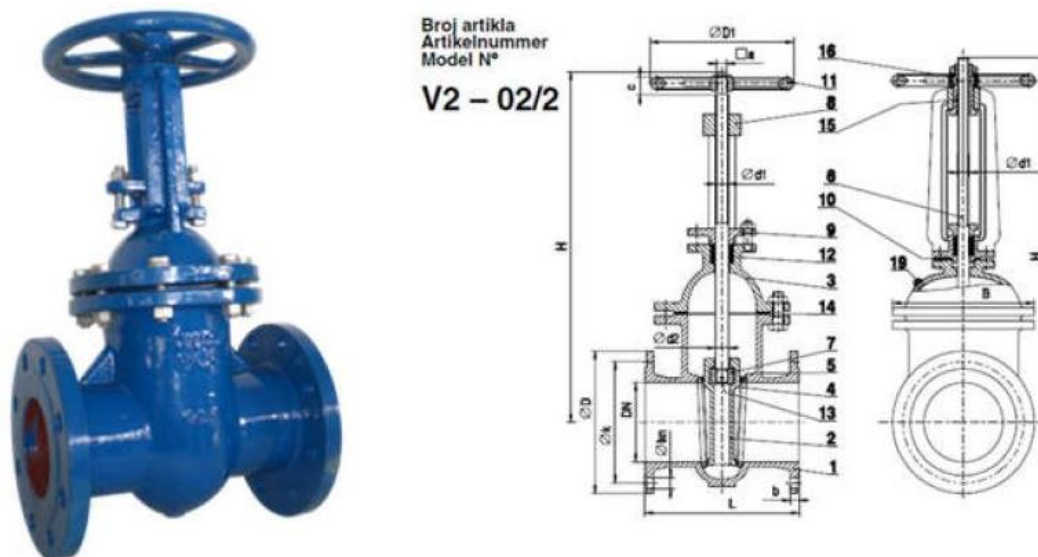
Na slikama 2.1-2.5 su prikazane najčešće vrste zasuna i ventila.



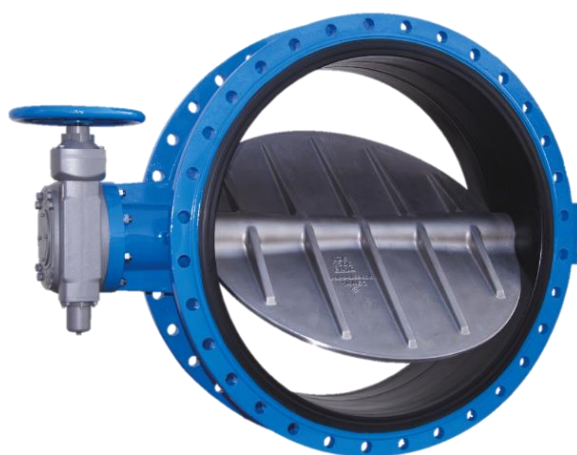
Slika 2.1. Eliptični zasun [10]



Slika 2.2. Leptirasti zasun [10]



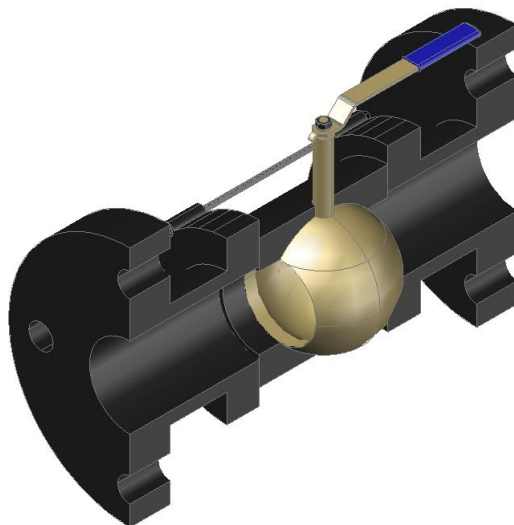
Slika 2.3. Ovalni zasun [10]



Slika 2.4. Leptirasti ventil [3]

Postoje brojne vrste ventila, a nazvani su uglavnom po elementu koji predstavlja karakteristiku njihovog rada ili dizajna: leptirasti, iglasti, kuglasti, ventil sa diskom, čepom, dijafragmom i mnogi drugi.

Slikom 2.5 prikazan je kuglasti ventil o kojemu će nadalje biti riječi, budući da je on temelj ovog diplomskog rada. U nastavku će termin „ventil“ biti zamijenjen terminom „zatvarač“ s obzirom da je zaustavljanje protoka njegova primarna funkcija.



Slika 2.5. Kuglasti ventil [4]

Kuglasti zatvarač svoju primjenu ne nalazi samo u vodoopskrbi, već se koristi i kao element ugradnje na plinskim cjevovodima i cjevovodima za grijanje. Služi za potpuno ili djelomično zaustavljanje vode ili plina u sustavu, te omogućuje promjene volumena radnog medija koji prolazi kroz cjevovod [2]. Zahvaljujući njihovoj svestranosti i širokoj primjeni dobivaju na popularnosti i postepeno zamjenjuju druge tipove ventila. Kuglasti zatvarači su svoju primjenu pronašli u miješalicama za opskrbu hladnom i toplom vodom, te u sustavu grijanja višekatnih zgrada. Također se primjenjuju i u raznim granama industrije. Kao integralne komponente u cijevnim sustavima primarno se koriste za kontroliranje, zaustavljanje, pokretanje, usmjeravanje i miješanje toka fluida. Njihova primjena je vrlo široka, od jednostavnijih medija poput vode, otapala, kiselina i prirodnog plina, pa do opasnijih poput vodikovog peroksida, metana i etilena. Ograničenje njihovog korištenja uvjetuju karakteristike njihovog materijala i sposobnost rada pri određenim vrijednostima temperature i tlaka.

Kuglasti zatvarač, kao i svaki element ugrađen u vodoopskrbni sustav mora zadovoljiti neke osnovne zahtjeve: otpornost na koroziju i kavitaciju, zadovoljenje na unutarnje i vanjsko opterećenje, potrebna hidraulička i hidrodinamička svojstva mreže te osiguranje nepropusnosti.

Kao glavni parametri ističu se dva pokazatelja: prvi je promjer zatvarača koji je određen postojećim standardima, a drugi je maksimalni tlak koji se javlja u mreži pri radu na 20 °C [6].

Svaki proizvođač kuglastih zatvarača je dužan osigurati njihovo točno označavanje s obzirom na propisane standarde. Oznaka mora sadržavati [6]:

- nominalni prolaz tj. nazivni promjer, označen kraticom DN
- nazivni tlak – PN
- vrijednost izračunatog (radnog) tlaka
- vrijednost maksimalne radne temperature
- strelicu koja pokazuje smjer kretanja vode
- datum izdavanja.

Kuglasti zatvarači su sve popularniji u različitim područjima zbog svoje pouzdanosti i jednostavnosti rada. No osim toga imaju još podosta prednosti:

- dugi radni vijek
- lak popravak koji ne iziskuje puno vremena
- visoki stupanj nepropusnosti (uz pravilnu instalaciju)
- prikladna kontrola poluge
- velika ponuda različitih modela ovisno o veličini i vrsti
- jednostavnost instalacije
- kompaktni dizajn.

Kao i svaki proizvod, tako i oni imaju određene nedostatke [7]:

- loša kvaliteta vode uzrokuje trošenje kugle
- ukoliko kroz zatvarač prolazi voda koja sadrži hrđu, tijekom otvaranja i zatvaranja dolazi do oštećenja površine. To naposljetku dovodi do činjenice da se zatvarač u zatvorenom položaju počinje „kotrljati“.
- ukoliko je zatvarač srednje kvalitete može doći do propuštanja
- zatvarač mora biti ugrađen samo u prostoriji gdje temperatura ne pada ispod 0 °C, iz razloga što u suprotnom dolazi do zamrzavanja vode i oštećenja zatvarača [7].



Kako bi se to spriječilo moguće je koristiti određena sredstva za izolaciju ili montirati kuglasti zatvarač otporan na smrzavanje. Ova vrsta u svome dizajnu ima ugrađen čep za zamrzavanje. U slučaju temperature niže od 0 °C dolazi do pucanja čepa što značajno olakšava popravak, budući da je umjesto zamjene cijelog zatvarača dovoljno promijeniti samo čep.

Kuglasti zatvarači su postojani, zadovoljavajuće se ponašaju nakon brojnih ciklusa rada, te se smatraju pouzdanima omogućujući sigurno zatvaranje čak i nakon dugih perioda bez upotrebe. Ove ih kvalitete čine odličnim izborom za upravljanje protokom fluida u cjevovodima.

Jednostavnost rada i popravka doveli su do njihove široke primjene u industriji, gdje zahvaljujući svojoj prilagodljivosti podnose pritiske do 1000 bara (100 MPa ili 15 000 psi) i temperature do 752 °F (400 °C), ovisno o dizajnu i materijalu zatvarača. Uglavnom su veličina od 0,2 do 48 inča (5,1 do 1219,2 mm). Tijelo zatvarača može biti izrađeno od metala, plastike ili metala u kombinaciji sa keramikom, a plutajući zatvarači su često kromirani zbog potrebe za većom trajnosti.

Kuglasti zatvarač se sastoji od sljedećih dijelova [6]:

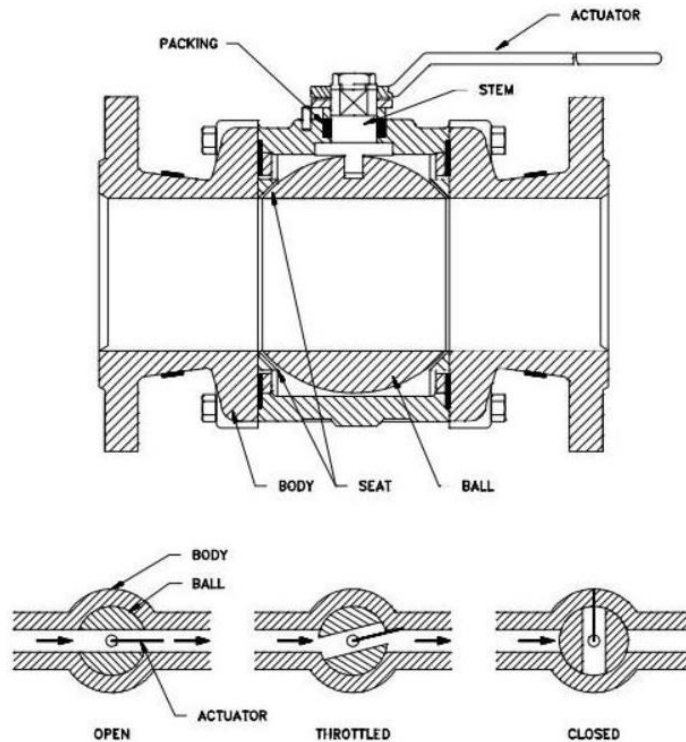
- mjedeno tijelo
- perforirana kugla od poliranog mesinga ili nekog drugog materijala
- prikladna ručka (poluga ili leptir, ovisno o promjeru i modelu zatvarača)
- matica za podešavanje
- pera za zbijanje
- brtveni prsteni
- gumena brtva
- šipka umetnuta u tijelo (materijal izrade mjedi).

Podnožje zatvarača sastoji se od rotacijskog elementa (kugle) sa mogućnošću zakretanja do 90°. Kugla sa prolaznim kanalom djeluje kao armatura odvajajući protok vode. Okretanjem ručice dolazi do pomicanja mehanizma, odnosno pomicanja prolaznog kanala što uzrokuje promjenu volumena transportirane tekućine ili zaustavljanje dovoda [7]. Kada se smjer

kanala podudara s osi cijevi propusnost je maksimalna, odnosno sva voda protječe kroz sustav. Detaljnije o radu zatvarača objašnjeno je u sljedećem poglavlju.

## 2.2. Rad kuglastih zatvarača

Zakretanje zatvarača odvija se pomoću poluge (ručke) koja je pričvršćena na kuglu pomoću šipke koja predstavlja mehaničko učvršćenje kugle. Njezin položaj je stabiliziran pomoću brtvenih prstenova koji su smješteni postrance, na kontaktu kugle i tijela zatvarača. Rotirajuća kugla ima otvor koji predstavlja prolazni kanal čija je os paralelna smjeru strujanja vode. Na slici 2.6 je moguće vidjeti poprečni presjek zatvarača sa osnovnim dijelovima, kao i poprečne presjeke sa mogućim pozicijama, ovisno o stupnju rotacije u odnosu na vertikalnu os.

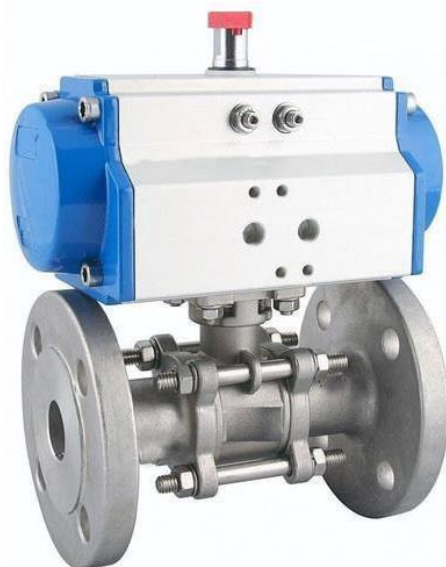


Slika 2.6. Presjeci zatvarača sa osnovnim dijelovima i pozicijama rotacije [6]

dijelovi: tijelo (body), kugla (ball), brtveni prsten (seat), držak (stem), poluga (actuator), gumena brtva (packing)

Kuglastim zatvaračima se može ručno upravljati ili mogu biti automatizirani. Ručno upravljani zatvarači koriste poluge, ručke, zupčanike ili kotače za pokretanje. Jeftini su i jednostavni za rukovanje, ali se mogu brzo zatvoriti i na taj način postoji opasnost od vodnog udara. Ne zahtijevaju vanjski izvor napajanja, već za pokretanje koriste kotačić ili polugu za pokretanje niza zupčanika čiji prijenosni odnos rezultira većim izlaznim momentom u odnosu na ulazni ručni (okretni) moment [16]. Trajni su, no automatizacija nije moguća, stoga je to njihov najveći nedostatak.

Neki su kuglasti zatvarači opremljeni aktuatorom koji može biti pneumatski, hidraulički ili električni. Pneumatski zatvarač za regulaciju protoka je opremljen pozicionerom koji pretvara upravljački signal u pogonski rad i sukladno tome dolazi do otvaranja (Slika 2.7). Koristi tlak zraka za pretvaranje u rotacijsko ili linearno gibanje.



Slika 2.7. Pneumatski pogonjen kuglasti zatvarač [8]

Hidraulički i elektrohidraulički, za razliku od pneumatskih, koriste tlak tekućine za pretvorbu u rotacijsko ili linearno gibanje. Električni aktuatori koriste motore na istosmjernu struju (DC) ili motore na jednofaznu ili trofaznu izmjeničnu struju (AC), koji pogone kombinaciju zupčanika za postizanje željene razine okretnog momenta [16]. Na slici 2.8 prikazan je kuglasti zatvarač pogonjen električnim aktuatorom.



Slika 2.8. Električno pogonjen kuglasti zatvarač [8]

Zatvarači su komponente sustava koje reguliraju protok ili tlak fluida. Ova uloga uključuje pokretanje i zaustavljanje protoka, kontrolu količine protekle vode, usmjeravanja toka, kontrolu tlaka ili njegovo ublažavanje. Sve navedeno se vrši podešavanjem položaja zatvarača.

Da bi se postigli neki specifični industrijski zahtjevi, kuglasti zatvarači su dizajnirani sa posebnom pažnjom kod sastavljanja, točnije prilikom umetanja kugle u tijelo zatvarača što kasnije omogućuje njegovo lakše održavanje.

Kuglasti zatvarač ima nekoliko tipova ručica kojima se regulira njegova otvorenost. Ime ručice ovisi o tome na što drška nalikuje, pa se tako razlikuje kuglasti zatvarač s ručicom poluge, leptira i sl.

## 2.3. Podjela kuglastih zatvarača

Kuglaste zatvarače je moguće podijeliti s obzirom na više karakteristika: kapacitet (otvor u kugli), dizajn, materijal izrade i način montaže.

### 2.3.1. Kapacitet

Ovisno o kapacitetu, kuglaste zatvarače moguće je podijeliti na: zatvarače sa punim otvorom, reduciranim otvorom, „V“ otvorom, zatvarače sa ispunjenim međuprostorom, mehanički učvršćene i plutajuće kuglaste zatvarače.

#### 1. Zatvarač sa punim provrtom (otvorom)

Karakteristika ovoga tipa je potpuno nalijeganje promjera otvora kugle i unutarnjeg promjera cjevovoda, odnosno jednakost te dvije veličine. Kao takav rezultira manjim gubicima na trenju i neograničenom protoku medija (tekućine, plina i dr.) u sustavu. Međutim, takvi zatvarači su vrlo velikih dimenzija i skuplji od ostalih, pa se koriste za sustave gdje je potreban slobodan protok fluida. Presjek ovakve vrste zatvarača prikazan je na slici 2.9.



Slika 2.9. Kuglasti zatvarač sa punim provrtom [27]

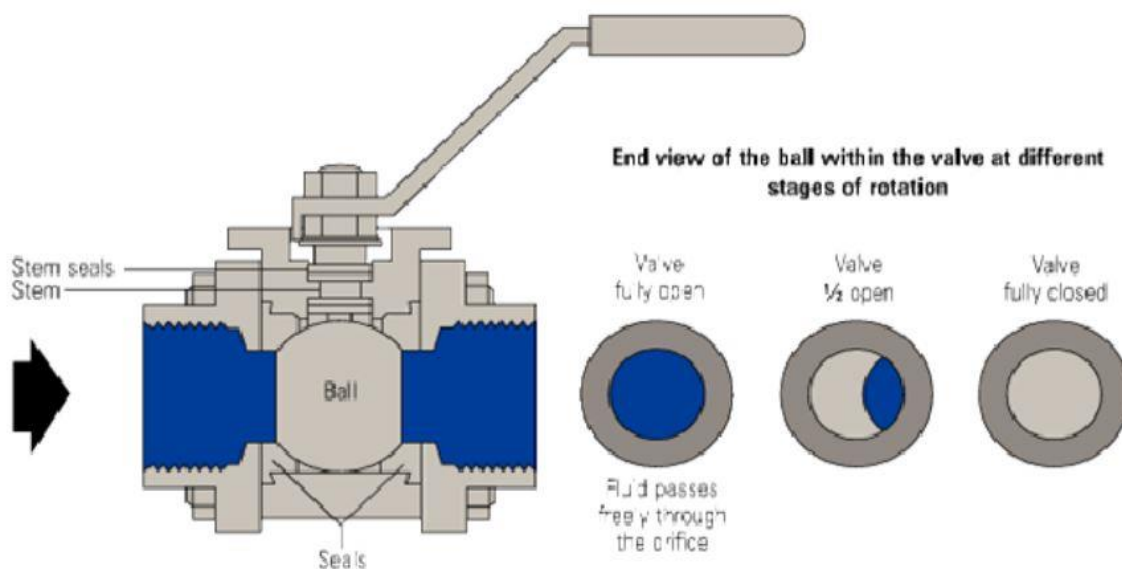
## 2. Zatvarač sa reduciranim provrtom (otvorom)

Za razliku od punog provrta, ovdje je promjer otvora u kugli manji od unutarnjeg promjera cijevi, što rezultira manjom površinom strujanja fluida u odnosu na prethodni slučaj. Pri konstantnom protoku zbog smanjenja površine poprečnog presjeka dolazi do povećanja brzine na tom području. To je najjednostavnije objasniti jednadžbom kontinuiteta, prikazanom formulama (2.1) i (2.2):

$$Q_1 = Q_2 \quad (2.1)$$

$$A_1 \times v_1 = A_2 \times v_2 \quad (2.2)$$

Na slici 2.10 je prikazan poprečni presjek takvoga tipa zatvarača gdje se može uočiti razlika u promjeru cijevi i otvora kugle. Prikazan je i poprečni presjek za tri slučaja otvorenosti: potpuna otvorenost, 50 %-tna otvorenost i zatvoren sustav.



Slika 2.10. Kuglasti zatvarač sa reduciranim provrtom [9]

dijelovi: kugla (ball), drška (stem), brtva drške (stem seat), brtveni prsten (seat)

### 3. Zatvarač sa „V“ otvorom

Kao što i samo ime implicira, zatvarač ima otvor u kugli oblika slova V što rezultira boljom kontrolom otvaranja i zatvaranja sustava. Princip se temelji na tome da najprije dolazi do otvaranja malog završetka „V“ kako bi se omogućila stabilna kontrola protoka kroz sustav. Ove vrste zatvarača koriste se za slučajeve koji zahtijevaju veću brzinu fluida, pa su tako njihovi dizajni generalno robusnije konstrukcije kako bi izdržali moguća oštećenja uslijed velikih brzina. Zatvarači sa „V“ otvorom mogu imati i brtvu oblikovanu u slovo „V“. Mogu se smatrati tipom regulacijskih zatvarača, ali obično nisu točni kao primjerice iglasti. Na slici 2.11 je, uz zatvarač, prikazana i kugla sa otvorom u obliku slova V.



Slika 2.11. Kuglasti zatvarač sa „V“ otvorom [9]

### 4. Zatvarač sa ispunjenim međuprostorom

Mnoge se industrije susreću sa problemom prisutnosti ostataka u kugli zatvarača. Razlog njihovog nastanka proizlazi iz činjenice što se u poluotvorenom položaju zatvarača stvara međuprostor (šupljina) između kugle i tijela zatvarača u kojoj dolazi do „zarobljivanja“ fluida. Kako bi ovakva pojava bila izbjegnuta, nužno je da šupljina bude začepljena što se može postići produljenjem brtvi na način da je uvijek ostvaren kontakt između njih i kugle. Takav

tip zatvarača je poznat kao „Cavity Filler“ ili kuglasti zatvarač sa ispunjenim međuprostorom. Ovaj tip dopušta prisustvo ostataka u zatvaraču, što bi kod nekih drugih tipova predstavljalo problem, ovisno o vrsti industrije u kojoj se primjenjuju. Primjerice, ukoliko je fluid, konkretno voda koja protječe cjevovodom namijenjena ljudskoj potrošnji (prehrani ljudi), ostaci mogu biti opasni za zdravlje.

## 5. Mehanički učvršćen zatvarač

Mehanički učvršćen ili „Trunnion“ kuglasti zatvarač ima dodatno osiguranje u vidu mehaničkog sidrenja kugle na vrhu i dnu, što je pogodno za zatvarače većeg radijusa izloženih višim vrijednostima tlaka, na primjer iznad 10 cm i 40 bara (Slika 2.12).



Slika 2.12. Mehanički učvršćen kuglasti zatvarač [9]

## 6. Plutajući kuglasti zatvarač

Plutajući kuglasti zatvarač ima kuglu koja se kreće kao odgovor na strujanje fluida. Budući da zatvarač nije učvršćen klinom, prilikom uobičajenog rada dolazi do toga da kugla polagano pluta nizvodno. Kao posljedica toga mehanizam za brtvljenje se komprimira pod pritiskom kugle.

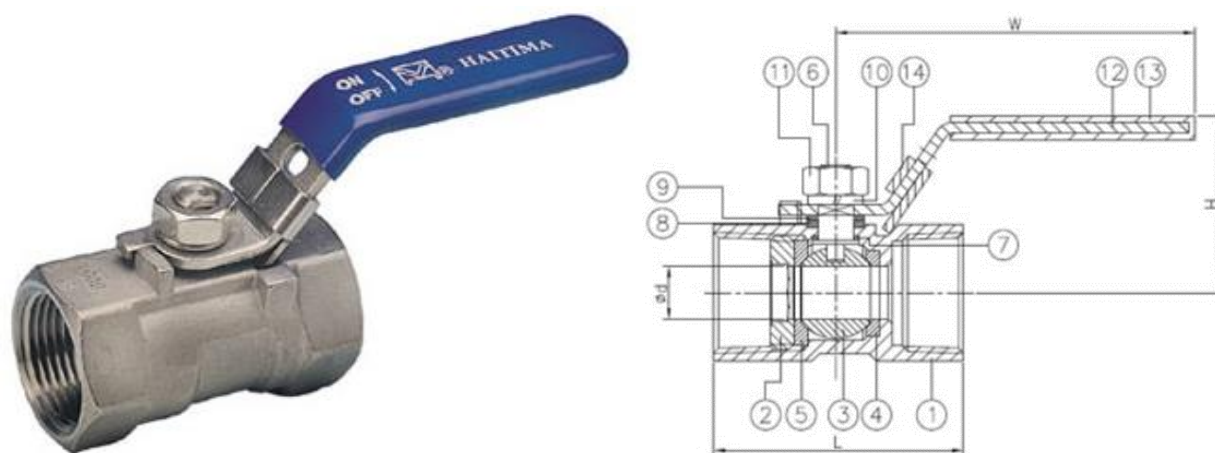
### **2.3.2. Dizajn**

Postoji pet općih dizajna kuglastih zatvarača: jednodijelni, dvodijelni, trodijelni, sa gornjim ulazom i zavareni. Razlika je u tome kako su dijelovi zatvarača, posebice kućište koje sadrži



samu kuglu, izrađeni i sastavljeni. Rad i funkcioniranje je u svakome od navedenih slučajeva jednak. Kuglasti zatvarači u veličinama do 2 inča generalno se pojavljuju kao jednodijelni, dvodijelni ili trodijelni.

Jednodijelni zatvarači se gotovo uvijek pojavljuju sa otvorom kugle manjim u odnosu na promjer cijevi, relativno su jeftini i obično se bacaju. U slučaju potrebe zamjene zatvarača, njegov dizajn nije pogodan kao kod dvodijelnih ili trodijelnih. Na slici 2.13 prikazan je jednodijelni tip zatvarača zajedno sa shemom i dimenzijama.



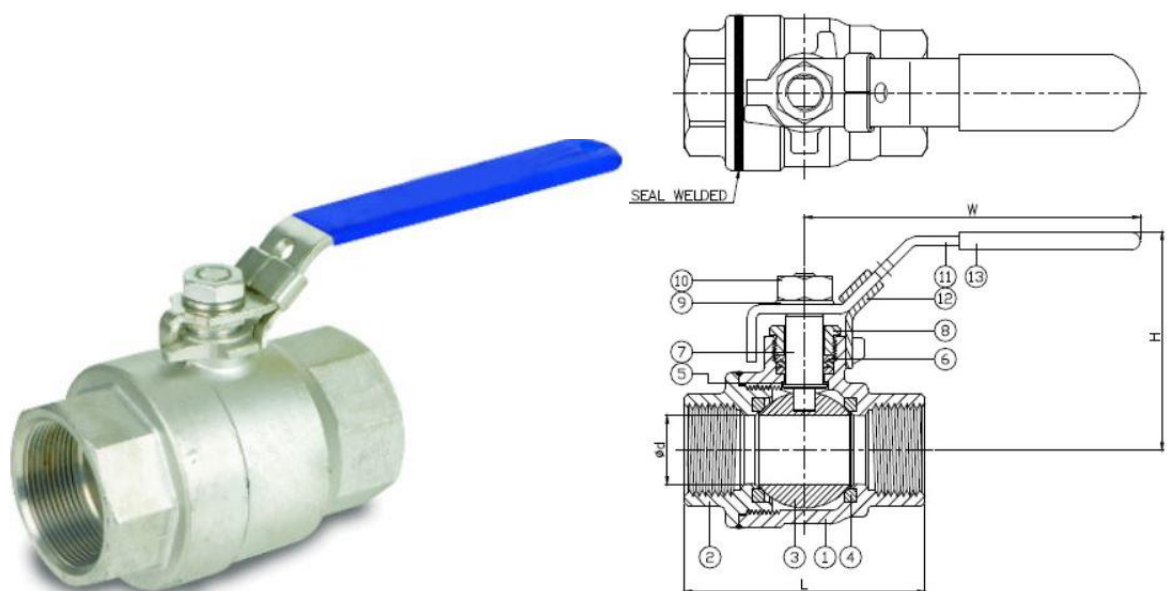
DN	d	L	H	W	Torque(N-M)	Weight(kg)
8	5	39	33	71	3.9	0.1
10	7	44	35	93	3.9	0.1
15	9.2	55	40	95	5.2	0.2
20	12.5	59	44	95	5.2	0.3
25	15	69	51	113	7.8	0.4
32	20	77	57	113	13	0.7
40	25	81	64	141	16.9	0.9
50	32	97	68	141	24.7	1.4
65	38	127	85	189	32.5	-
80	50	153	90	189	52	-

unit:mm

Slika 2.13. Jednodijelni kuglasti zatvarač [10]

Elementi u tablici: DN (nazivni promjer), d (promjer otvora kugle), L (ukupna duljina zatvarača), H (visina mjerena od centra kugle do poluge), W (duljina poluge-mjereno od centra kugle), torque (okretni moment), weight (težina)

Dvodijelni zatvarači su uglavnom blago reduciranog ili čak standardnog otvora kugle, te se mogu popraviti i ponovno koristiti ili odbaciti. Dizajnirani su na način da su podijeljeni u dva komada i smješteni u istoj ravnini kao i prirubnica te spojeni zajedno. Kod takvih zatvarača je jednostavnije održavanje. Na slici 2.14 prikazan je dvodijelni tip zatvarača zajedno sa shemom i dimenzijama.



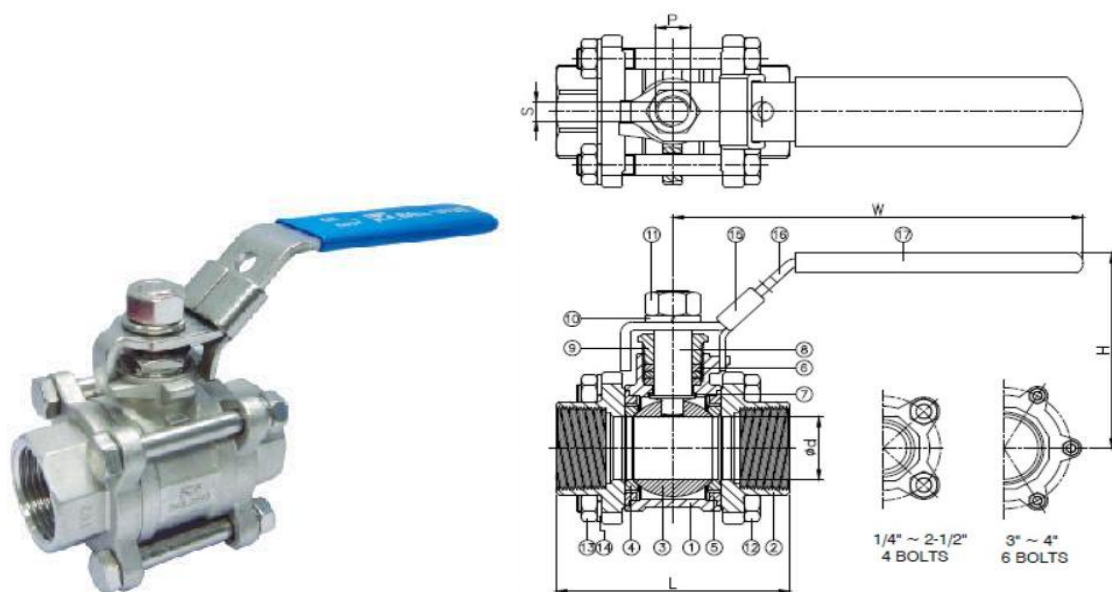
DN	d	L	H	W
8	11.6	51	54.6	101
10	12.5	51	54.6	101
15	15	60	56.5	101
20	20	70	64.3	124
25	25	83	76.7	162
32	32	97	82	162
40	38	110	96.1	183
50	50	134	104.2	183
65	65	167	142.6	245
80	76	192	152.6	245

unit:mm

Slika 2.14. Dvodijelni kuglasti zatvarač [10]

Elementi u tablici: DN (nazivni promjer), d (promjer otvora kugle), L (ukupna duljina zatvarača), H (visina mjerena od centra kugle do poluge), W (duljina poluge-mjereno od centra kugle), torque (okretni moment), weight (težina)

Trodijelni dizajn omogućuje da se središnji dio zatvarača koji sadrži kuglu, osovinu i brtve lako izvadi iz cjevovoda. Time se omogućuje olakšano čišćenje naslaganih sedimenata, zamjena brtvi, poliranje sitnih ogrebotina na kugli, a sve to na relativno jednostavan način. Zatvarače takvog dizajna moguće je zamijeniti. Montaža i dizajn su slični dvodijelnim zatvaračima, a jedina razlika što je u ovome slučaju zatvarač podijeljen u tri komada smještenih uzduž iste ravnine kao i prirubnica zatvarača. Slikom 2.15 prikazan je trodijelni tip zatvarača sa shemom i dimenzijama.



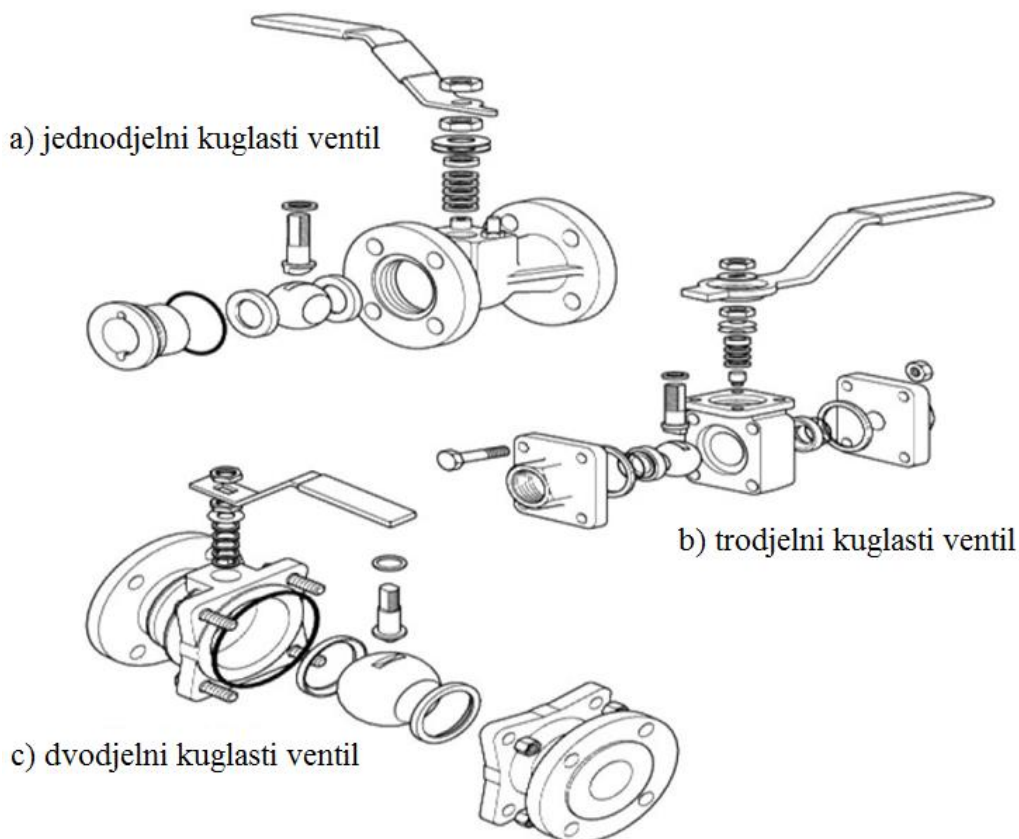
DN	d	L	H	W	S	P	Torque (N-M)	Weight(kg)
8	11.6	65	60.2	98	5	3/8"~24UNF	3.5	0.4
10	12.5	65	60.2	98	5	3/8"~24UNF	4	0.4
15	15	65	62.2	98	5	3/8"~24UNF	5.5	0.5
20	20	75	64.6	121	6.5	7/16"~20UNF	7.5	0.7
25	25	85	80.1	147	8	7/16"~20UNF	11	1.1
32	32	101	85.1	147	8	7/16"~20UNF	15	1.6
40	38	112	103.3	188	10	1/2"~20UNF	20	2.4
50	50	130	110.8	188	10	1/2"~20UNF	40	3.1
65	63	162	141.7	245	12	3/4"~10UNC	60	6.5
80	76	188	150.4	245	12	3/4"~10UNC	85	9.5
100	96	224	181.7	316	16	1"~8UNC	150	19

unit:mm

Slika 2.15. Trodijelni kuglasti zatvarač [11]

Elementi u tablici: DN (nazivni promjer), d (promjer otvora kugle), L (ukupna duljina zatvarača), H (visina mjerena od centra kugle do poluge), W (duljina poluge-mjereno od centra kugle), torque (okretni moment), weight (težina)

Slikom 2.16 prikazani su načini montaže i elementi prethodno opisanih tipova zatvarača. Gore lijevo je prikazan jednodijelni zatvarač (*eng. Single piece ball valve*), dolje lijevo je prikazan dvodijelni (*eng. Two piece ball valve*), a u sredini trodijelni kuglasti zatvarač (*eng. Three piece ball valve*).



Slika 2.16. Načini montaže kuglastih zatvarača [9]

### 2.3.3. Materijal

Što se tiče materijala za izradu kuglastog zatvarača, najpovoljniji i najprihvaćeniji je mesing. Osim što slovi za čvrsti materijal, vrlo dobro podnosi visoki tlak i temperaturu, a korozija nema toliki utjecaj kao na druge materijale. Kao dodatna prednost može se navesti estetska prihvatljivost i mala težina.

Od ostalih materijala koriste se bronca, plastika i čelik. Bronca je također jak materijal, ali skuplji u odnosu na mesing (slika 2.17). Plastika kao materijal nije pogodan iz razloga što se uređaji mogu montirati isključivo na plastične cjevovode te za druge vrste sustava nisu prikladne.



Slika 2.17. Brončani kuglasti zatvarač [12]

Čelični zatvarači su poznati po laganoj težini i minimalnoj debljini stjenke. Mogu izdržati maksimalno opterećenje i pritisak, a koriste se u temperaturnim uvjetima od  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Osnovni dijelovi čeličnog zatvarača su sferno tijelo i cilindrične mlaznice. Kugla je izrađena od visokokvalitetnog čelika i nema veznih vijaka, čime je spriječeno propuštanje pod pritiskom radne okoline [13]. Primjer čeličnog trodijelnog kuglastog zatvarača prikazan je na slici 2.18.



Slika 2.18. Čelični trodijelni kuglasti zatvarač [12]

Karakteristike čeličnih kuglastih zatvarača su [13]:

- omogućuje zatvaranje protoka pri velikoj brzini,
- jednostavno montiranje i upravljanje,
- nema zahtjeva za posebnim održavanjem,
- otpornost na visoke temperature, te
- predstavljaju vrlo dobar izbor na temelju omjera troškova i kvalitete proizvoda.

U novije vrijeme došlo je do razvoja polietilenskih kuglastih zatvarača koji se koriste u instalaciji modernih polietilenskih HDPE cijevi (Slika 2.19). Svoju primjenu nalaze u sustavu opskrbe pitkom vodom, sustavima za navodnjavanje, u opskrbi hladne industrijske vode u privatnim i gradskim zgradama, u izgradnji bazena i sl. Instalacija nije složena i izvodi se pomoću kompresijske spojnice (s kolutima).



Slika 2.19. PVC kuglasti zatvarač [12]

Osim otpornosti na mraz polietilenski zatvarači imaju i jedno svojstvo kojim je vidljiva prednost u odnosu na materijale poput mesinga i čelika: prilikom zamrzavanja vode u zimskim mjesecima ne dolazi do oštećenja zatvarača. Ipak, ne mogu izdržati velike temperature kao i čelik; maksimalna je 45 °C.

### 2.3.4. Način montaže

Montaža kuglastih zatvarača provodi se na tri načina: zavarivanjem, navojem ili prirubnicama.

#### I. Metoda zavarivanja

Metoda ima najveću primjenu u ugradnji industrijskih cjevovoda, dok u privatnim vodoopskrbnim sustavima nije toliko prihvatljiva zbog potrebe za korištenjem stroja za zavarivanje i vještine za rad s njime. Inače se smatra najpouzdanijom metodom koja pruža najbolju nepropusnost, ali popravak zatvarača donosi komplikacije jer se za tu svrhu uređaj mora izrezati iz cjevovoda. Na slici 2.20 prikazan je zatvarač sa zavarenim krajevima.



Slika 2.20. Kuglasti zatvarač sa zavarenim krajevima [14]

Proces zavarivanja obuhvaća sljedeće faze [13]:

- rezanje cijevi na mjestu gdje je predviđena ugradnja zatvarača,
- čišćenje rubova, njihovo izravnavanje kao i izravnavanje tla,
- postavljanje elemenata na pripremljenu površinu i fiksiranje pomoću stroja za zavarivanje,
- provjera spojeva na propuštanje, te
- zaštita i čišćenje zavarenih spojeva i prekrivanje slojem boje ili premaza.

## II. Montaža navojem

Njezina prednost u odnosu na metodu zavarivanja je u tome što se navojna veza može odvojiti ukoliko dođe do oštećenja zatvarača, što mnogo olakšava njegovu zamjenu. Primjer takvoga zatvarača prikazan je slikom 2.21.



Slika 2.21. Kuglasti zatvarač montiran navojnom vezom [14]

## III. Montaža prirubnicama

Kao i navojna veza, priključak prirubnice je također odvojiv, no taj se način montaže koristi uglavnom u industrijskim sustavima. Montaža na privatne vodoopskrbne sustave nije toliko popularna iz razloga što bi bilo potrebno zavariti posebne prstenove na kojima će se učvrstiti armatura. Slikom 2.22 prikazan je kuglasti zatvarač sa priključkom prirubnice.



Slika 2.22. Kuglasti zatvarač sa priključkom prirubnice [14]



## 2.4. Određivanje brzina i protoka na kuglastim zatvaračima

Određivanje fizikalnih veličina poput brzine, tlaka i protoka vrši se na različite načine, ovisno o vrsti i načinu pokretanja zatvarača. Postoje mnoge vrste mjerača protoka koje su na raspolaganju za upotrebu u industrijskoj automatizaciji. Ovisno o mediju čije se karakteristike mjere, bilo tekućina ili plin, vrijede neka osnovna načela rada, pa se tako razlikuju sljedeći uređaji: magnetski, mehanički, Vortex i ultrazvučni mjerač protoka.

Magnetski mjerač ili „magmetar“ predstavlja odličan izbor za otpadnu vodu koja se smatra nečistom ili prljavom. To su volumetrijski mjerači koji nemaju pokretne dijelove u svome dizajnu, što je idealno za izbjegavanje izloženosti tekućine kojoj se mjere određeni parametri. Rad magnetskog mjerača zasnovan je na formuli Faradaya. Važno je da fluid bude provodljiv. Mjeri se napon koji je ovisan o prosječnoj brzini fluida, jačini magnetskog polja i duljini vodiča, što odlično prikazuje formula (2.3):

$$E = B * L * v \quad (2.3)$$

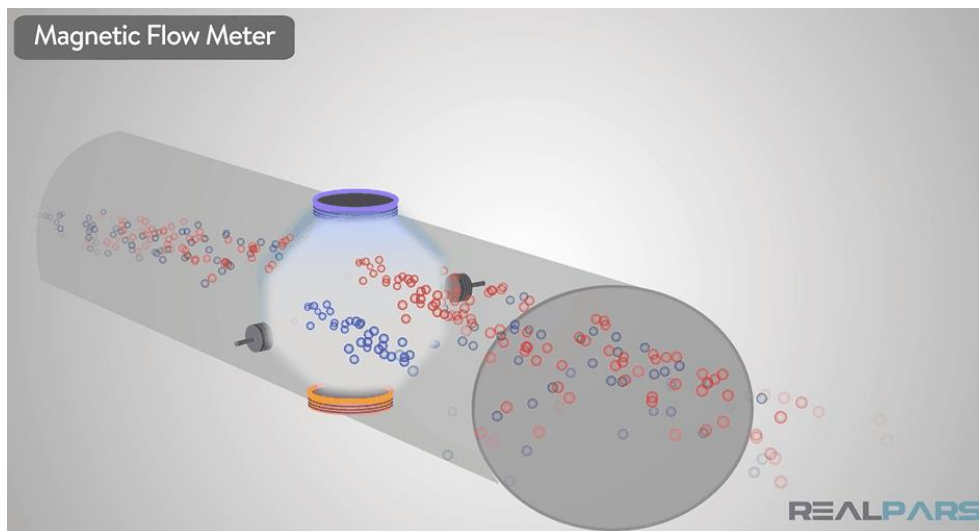
gdje je:

$B$  – jačina magnetskog polja

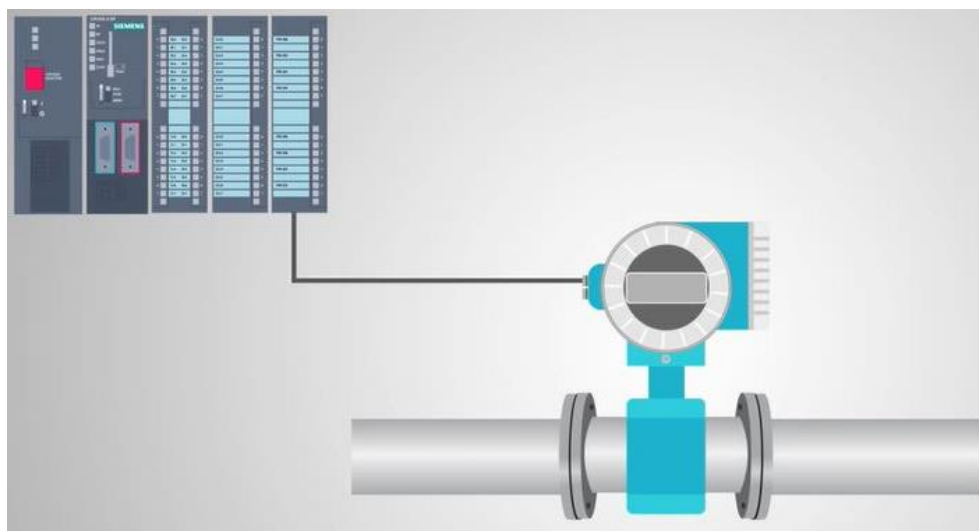
$L$  – duljina vodiča (udaljenost između elektroda)

$v$  – prosječna brzina fluida.

Slikama 2.23 i 2.24 prikazani su princip rada magnetskog mjerača i prijenos signala do računala.



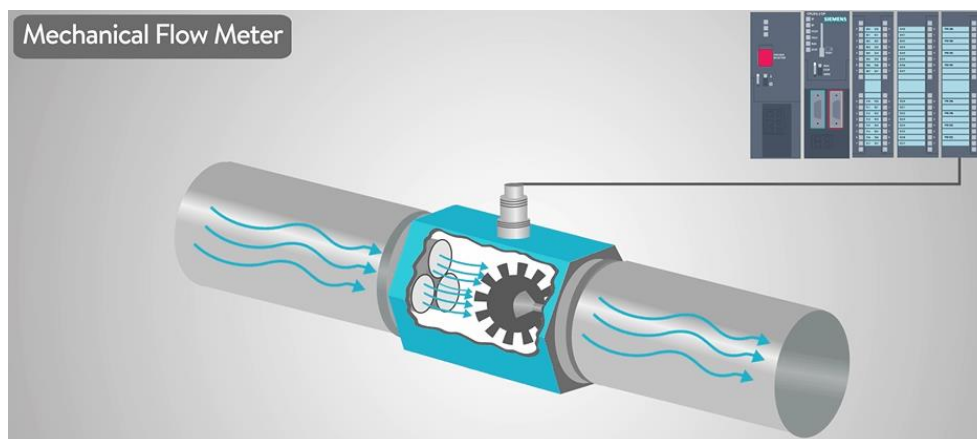
Slika 2.23. Strujanje fluida i princip mjerenja brzina i protoka [15]



Slika 2.24. Shema prijenosa signala sa magnetskog mjeraca protoka [15]

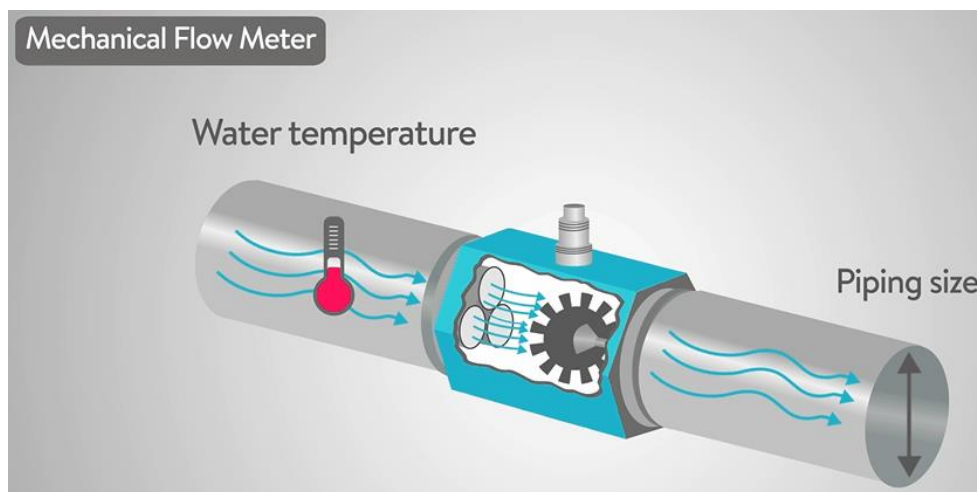
Za razliku od magnetskog, mehanički mjerac u svome dizajnu ima unutarnje pokretne dijelove čija primjena nije pogodna za otpadne vode, budući da one sadrže različite supstance koje mogu oštetiti takav tip mjeraca. Pokretni dio je oblika kotača ili propelera. Tekućina koja struji kroz cijev uzrokuje rotaciju lopatica propelera, što stvara veličinu protoka proporcionalnu sa brzinom rotacije propelera. Najjednostavnije rečeno, što je veća brzina

rotacije fluida veći je protok, čija se vrijednost putem signala odašilje do računala. Na slici 2.25 prikazana je shema spoja mehaničkog zatvarača i princip njegovog rada.



Slika 2.25. Princip rada mehaničkog mjerača protoka [15]

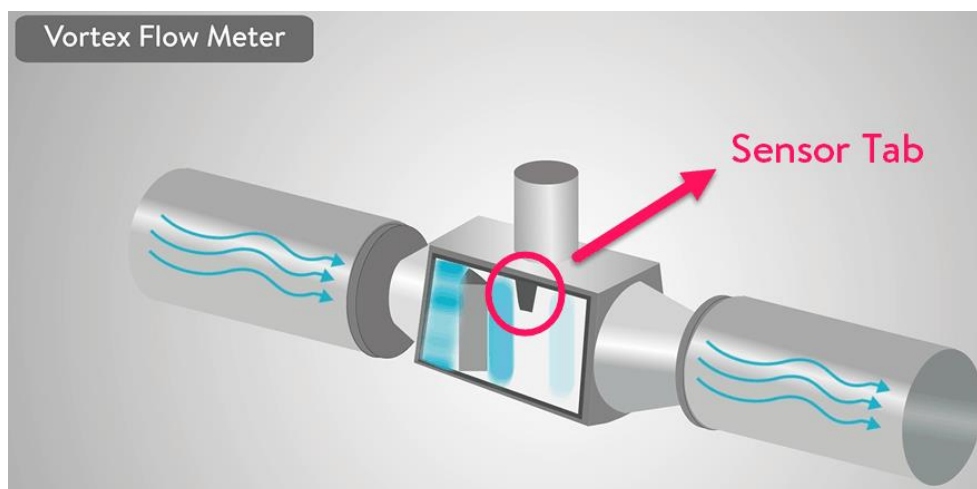
U obzir je potrebno uzeti i promjer cijevi, temperaturu fluida i ostale parametre koji mogu dodatno otežavati situaciju (slika 2.26).



Slika 2.26. Parametri koji utječu na mjerenje [15]

Napomena: temperatura vode (water temperature) i promjer cijevi (piping size)

Sljedeći tip mjerača je „Vortex“ ili vrtložni mjerac protoka kod kojega se određivanje fizikalnih parametara temelji na mjerenju vrtloga (Slika 2.27). Princip rada se sastoji u savijanju jezička senzora (*eng. „sensor tab“*) ovisno o prolasku vrtloga, čime se proizvodi izlazna frekvencija proporcionalna volumetrijskom protoku.



Slika 2.27. Princip rada vrtložnog mjeraca protoka [15]

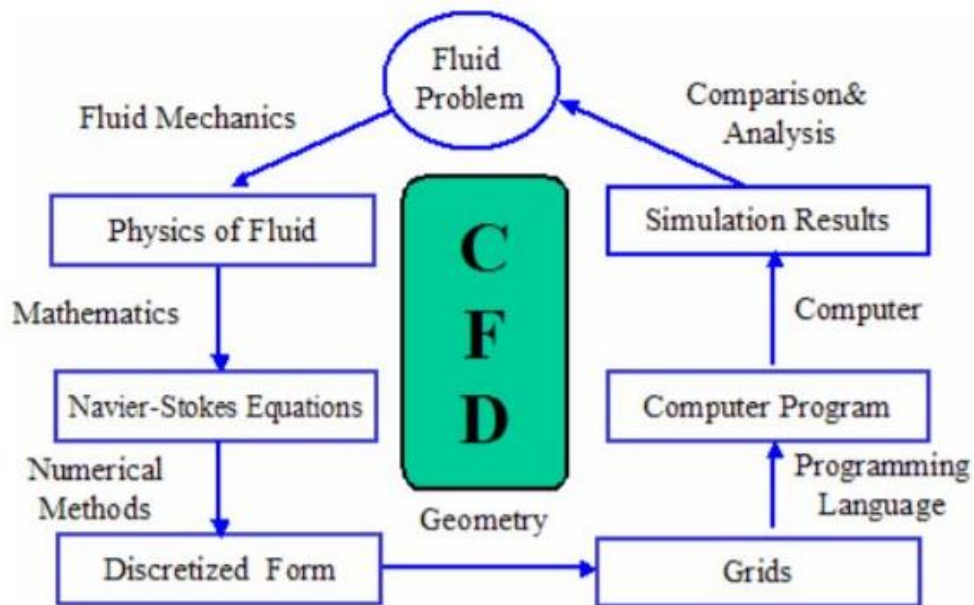
Ultrazvučni mjeraci rade na principu odašiljanja ultrazvučnog signala nizvodno, odnosno u smjeru toka, dok se drugi signal prenosi uzvodno. Razlika u vremenu se koristi za izračunavanje brzine fluida, koja se potom koristi za izračunavanje protoka kroz cijev.

### 3. PRIMJENA ANSYS WORKBENCH PROGRAMSKOG PAKETA

#### 3.1. Računalna dinamika fluida

Mehanika fluida je područje znanosti koja se bavi proučavanjem fizikalnih zakona čiji je zadatak reguliranje protoka fluida pod različitim uvjetima.

Računalna dinamika fluida (*eng. Computational Fluid Dynamics, CFD*) je dio mehanike fluida koji obuhvaća simulacije fluida koristeći modeliranje (matematičko fizikalni problem) i numeričke metode (metode diskretizacije, rješenja, numerički parametri, generiranje mreža itd.) [16]. Proces provođenja simulacije opisan je slikom 3.1.



Slika 3.1. Proces provođenja simulacije u CFD-u [16]

Počeci razvitka Računalne dinamike fluida su zabilježeni 1960-ih, dok se prvi uspjeh dogodio 1970-ih godina. Može se reći da Računalna dinamika fluida kvantitativno prognozira što će se dogoditi pri protjecanju fluida, često sa složenim slučajevima poput [17]:

- istodobnog toka topline,
- promjena agregatnog stanja (topljenje, zamrzavanje),
- kemijska reakcija (gorenje, hrđanje), te
- mehaničko kretanje (klip, ventilator, kormilo).

Znajući kako će fluid strujati i koliki će biti njegov kvantitativni utjecaj na elemente s kojima je u kontaktu, pomaže da:

- građevinari i arhitekti osiguraju uvjete za ugodno i sigurno okruženje korisnika objekata,
- se u sustavu elektrana postigne maksimalna učinkovitost i smanjeno ispuštanje zagađivača,
- kemijski inženjeri maksimiziraju prinose svojih reaktora,
- analitičari za rizik i hazard te inženjeri sigurnosti mogu predvidjeti kolika će šteta na građevinama, opremi, ljudskom dobru, životinjama i vegetaciji biti uzrokovana požarima, eksplozijama i eksplozijskim valovima.

CFD nam je omogućio shvatiti svijet na nove načine. Zahvaljujući njegovom razvitku moguće je shvatiti i vizualizirati mnogo pojava i prirodnih procesa, primjerice kako struji zrak oko nas, kako krv teče našim venama i arterijama i sl. Moguće je provoditi simulacije leta aviona i vožnje automobila u svrhu postizanja što sigurnijih uvjeta za korisnike. U principu, moguće je stvoriti nešto potpuno novo na temelju virtualnog svijeta.

Postoji mnogo razloga sve veće popularnosti CFD-a [18]:

- CFD omogućuje numeričke simulacije strujanja fluida čiji su rezultati dostupni za proučavanje i nakon završetka analize
- omogućuje promatranje fizikalnih parametara bez ometanja toka, što nije uvijek moguće konvencionalnim metodama mjerenja
- omogućuje promatranje fizikalnih parametara na lokacijama koje su ili nedostupne ili mogu oštetiti mjerne uređaje (npr. između lopatica turbine)
- može se koristiti kao kvalitativni alat za odbacivanje (ili sužavanje izbora) različitih dizajna odnosno modela. Dizajneri i analitičari mogu proučavati više prototipova numerički, a zatim eksperimentalno testirati samo one koji se pokažu zadovoljavajućima.

Međutim, unatoč svim prednostima, CFD i dalje nije moguće primijeniti za određene situacije iz idućih razloga [18]:

- CFD još uvijek nije na takvoj razini da ga analitičari mogu koristiti bez ili sa slabim znanjem numerike
- iako CFD napreduje po pitanju sve veće brzine proračuna, i dalje je potrebno značajno vrijeme da se numeričke analize postave i izvrše
- CFD se još uvijek koristi kao dodatak drugim analizama i eksperimentalnim alatima, te se koristi zajedno sa njima (npr. testiranje vjetroelektrana).

### **3.2. Ansys CFX kompjuterski program**

Kao alat za računalnu dinamiku fluida koristi se ANSYS Workbench programski paket koji ima niz proizvoda, od kojih je neophodno spomenuti ANSYS CFX kompjuterski program, budući da su simulacije u ovome radu provedene korištenjem istog. To je program visokoga učinka koji već više od 20 godina vrlo uspješno rješava probleme strujanja fluida. Njegova osnovna karakteristika je napredna tehnologija rješavanja, zahvaljujući kojoj dolazi do pouzdanih i točnih rješenja brzo i robusno. Moderan kompjuterski program je temelj raznovrsnog izbora fizikalnih modela kojima se može obuhvatiti bilo kakva vrsta fenomena povezana sa strujanjem fluida: od laminarnog do turbulentnog strujanja (uključujući i prijelazno), nekompresibilna do potpuno kompresibilna, podzvučna do trans- i nadzvučna, izotermalna ili s prijenosom topline konvekcijom i/ili zračenjem, i mnoge druge vrste strujanja [19].

Proces simuliranja u ANSYS CFX kompjuterskom programu se sastoji od tri faze: preprocesiranje, procesiranje ili procesor i postprocesiranje.

Predprocesiranje obuhvaća:

- zadavanje geometrije,
- diskretizaciju sustava (generiranje numeričke mreže),
- definiranje početnih i rubnih uvjeta, te
- definiranje fizikalnog modela.

Procesiranje je faza u kojoj se pokreće simulacija na način da se parcijalne diferencijalne jednačbe (pretežno Navier-Stokesove) rješavaju iterativno.

Postprocesiranje je finalna faza u kojoj se vrši obrada i analiza dobivenih podataka, odnosno dobivaju rješenja pojedinih fizikalnih veličina koje je moguće prikazati kroz ravninske ili konturne prikaze, prikaze strujnicama ili kroz numeričke simulacije. Također se mogu vršiti pojedinačne usporedbe dviju fizikalnih veličina u pojedinim numeričkim modelima/podmodelima kroz grafičke ili tablične prikaze i dr.

Za diskretizaciju sustava moguće je koristiti neku od sljedećih metoda:

- Metoda konačnih razlika (MKR, eng. *Finite Difference Method – FDM*)
  - predstavlja najstariju diskretizacijsku metodu koja svoj razvitak doživljava primjenom računala, budući da je numerička metoda
  - sastoji se od mreže konačnih razlika sastavljene od diskretiziranih točaka razmatranoga područja. U točkama se postavljaju diferencijalne jednačbe. Derivacije se zamjenjuju konačnim razlikama opisanim vrijednostima zavisnih varijabli susjednih čvorova [20]. Na taj se način dobivaju algebarske jednačbe, a vrijednosti varijabli izračunate u čvorovima predstavljaju rješenja algebarskih jednačbi.
  - Metoda se primjenjuje u mehanici fluida i za vremensku diskretizaciju nestacionarnih problema.
- Metoda konačnih volumena (MKV, eng. *Finite Volume Method - FVM*)
  - 1970-ih se počinje primjenjivati u mehanici fluida
  - dobivena je kao posebna formulacije MKR-a
  - primjenu nalazi u mehanici fluida. Temelji se na podjeli domene na konačan broj kontrolnih ili konačnih volumena, koji se ne smiju preklapati. Za svaki kontrolni volumen postavlja se integralna jednačba, gdje se volumni integrali transformiraju u površinske [20]. Za svaki se kontrolni volumen izvodi algebarska jednačba, pa se tako dobiva skup algebarskih jednačbi.



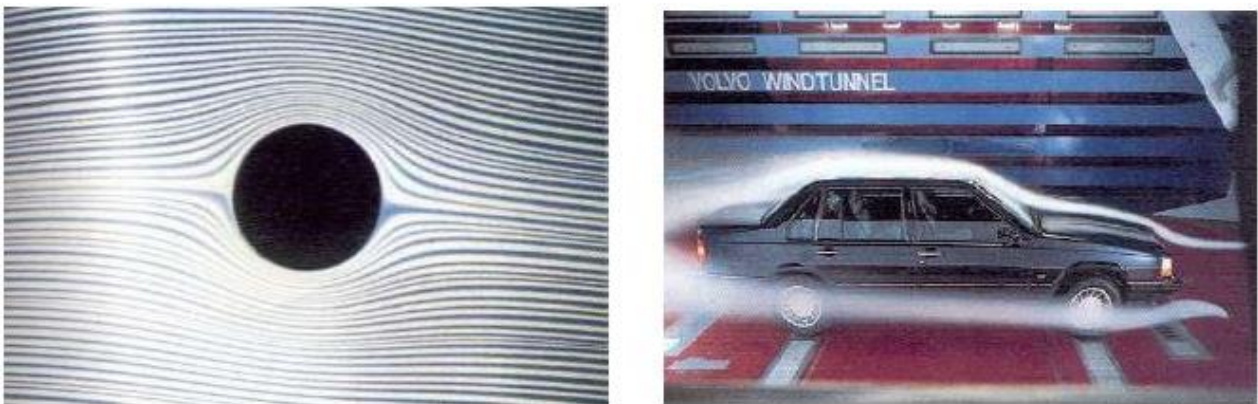
- Metoda konačnih elemenata (MKE, eng. *Finite Element Method - FEM*)
  - njezina primjena započinje 1960-ih godina
  - kao i kod prethodnih metoda promatrano područje se dijeli na mrežu, no ovdje je čine konačni elementi. Za svaki se element pretpostavi rješenje diferencijalne jednačbe, u obliku interpolacijskih funkcija i zavisnih varijabli u čvorovima [20]. Dalje je princip rješavanja jednak: za svaki konačni element se izvodi algebarska jednačba čime se dobiva skup algebarskih jednačbi.

ANSYS CFX kompjuterskim programom vrši se diskretizacija sustava metodom konačnih volumena.

Ovo će poglavlje ponajviše biti posvećeno fazi predprocesiranja, točnije pojašnjenju načina diskretizacije sustava i izvodima jednačbi koje su temelj modeliranja u Ansys CFX kompjuterskom programu. Faze procesiranja i postprocesiranja objašnjene su u idućem poglavlju zajedno sa značajkama numeričkog modela.

### 3.3. Turbulencija i $k-\varepsilon$ turbulentni model

Strujanje fluida moguće je prikazati strujnicama – zamišljenim linijama čija tangenta u svakoj točki prikazuje smjer brzine (Slika 3.2). Njihova gustoća je proporcionalna brzini fluida; gušće položene strujnice podrazumijevaju veću brzinu strujanja.



Slika 3.2. Prikaz opstrujavanja fluida oko tijela oblika kruga i automobila [21]

Karakter strujanja određuje se Reynoldsovim brojem  $Re$ , odnosno bezdimenzionalnom veličinom koja se može izraziti preko omjera inercijskih i viskoznih sila, kao što je prikazano formulom (3.1):

$$Re = \frac{v \cdot D}{\nu} \quad (3.1)$$

gdje je:

$Re$  – Reynoldsov broj, [/]

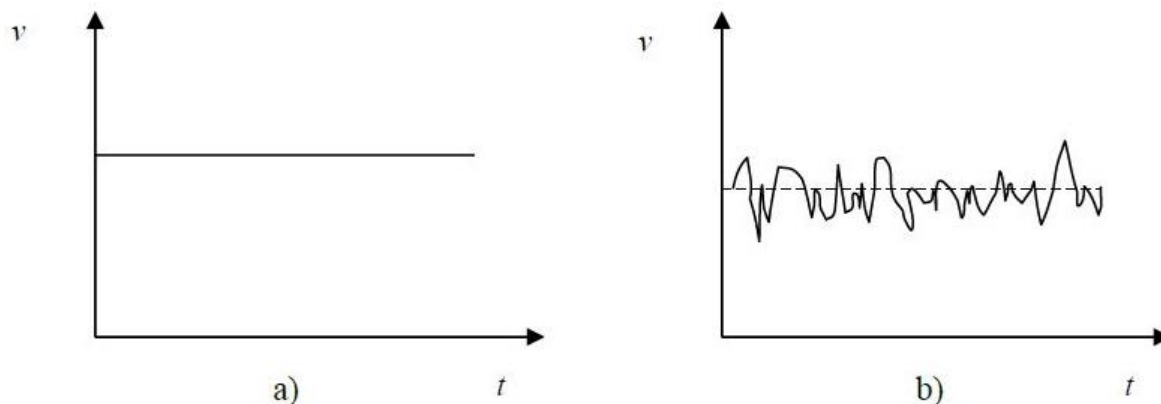
$v$  – brzina fluida [m/s]

$D$  –promjer cijevi [m]

$\nu$  – koeficijent kinematičke viskoznosti [m<sup>2</sup>/s].

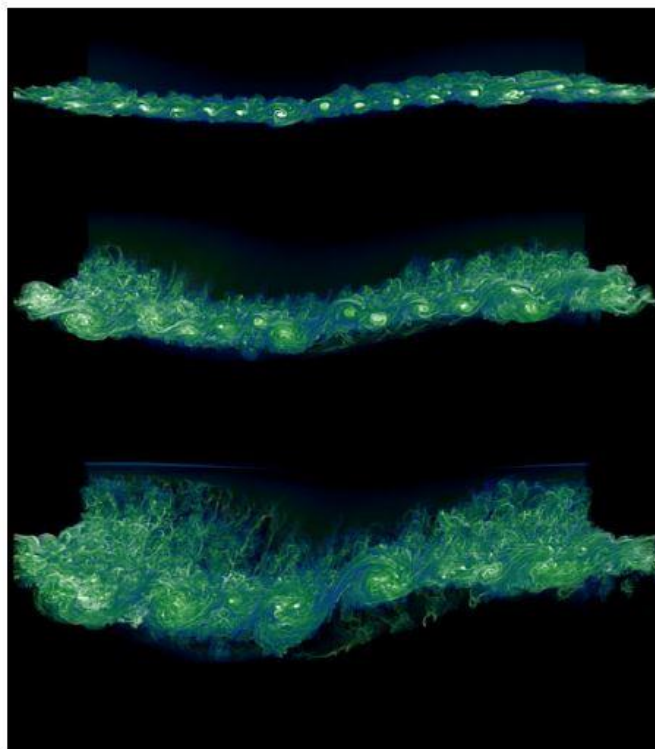
Laminarno strujanje se može opisati kao mirno, uređeno slojevito kretanje bez miješanja između slojeva. Pojavljuje se u slučajevima malih vrijednosti Reynoldsovog broja  $Re$  i može se riješiti analitički u ograničenom broju slučajeva [22]. Uzrok njegove pojave je prevladavanje viskoznih sila u odnosu na inercijske.

Turbulentno strujanje se može opisati kao kaotično, neuređeno kretanje koje se pojavljuje pri velikim vrijednostima Reynoldsovog broja. Najčešći je oblik strujanja, budući da se rijetko koje strujanje odvija u idealnim uvjetima sa vrlo malim ili nikakvim promjenama fizikalnih veličina. Neki od primjera turbulentnog strujanja su: strujanja u vodoopskrbnim cijevima (pretežno kod račvanja i na zatvaračima, ventilima) i plinovodima, opstrujavanje oko automobila, vlaka, aviona i slično. Takvo je strujanje nestacionarno, okarakterizirano intenzivnim miješanjem fluida koji strujanju daje difuzijski karakter uz posljedicu povećanja disipacije energije [22]. Uzrok njegove pojave je suprotan slučaj u odnosu na pojavu laminarnog strujanja, odnosno prevladavanje inercijskih nad viskoznim silama. Razlika između ta dva strujanja može se prikazati slikom 3.3, gdje je vidljivo kako je brzina kod laminarnog strujanja konstantna, dok se kod turbulentnog strujanja u svakoj točki mijenja po intenzitetu i smjeru.



Slika 3.3. Vrijednost brzine u poprečnom presjeku cijevi, a) laminarno strujanje b) turbulentno strujanje [21]

Turbulenciju se može opisati kao način gibanja fluida čija je osnovna karakteristika pojava naizgled slučajnih i kaotičnih trodimenzionalnih vrtložnosti. Prilikom njezine prisutnosti u sustavu, ona dominira nad svim drugim pojavama i stvara povećani gubitak energije, miješanje, prijenos topline i otpore [23]. Primjer simulacije turbulentnog strujanja prikazan je na slici 3.4.



Slika 3.4. Simulacija turbulentnog (kaotičnog) strujanja [23]

Zbog kaotičnog, neuređenog karaktera turbulentno strujanje se ne može riješiti analitički već za to treba primijeniti neke od postojećih modela, koji se temelje na eksperimentalnim rješenjima.

Postoji pet razreda u koje se može svrstati modeliranje turbulencija:

- algebarski,
- sa jednom jednačbom,
- sa više jednačbi,
- model Reynoldsovih naprežanja (RSM), te
- model stimuliranja velikih vrtloga (LES) [24].

Modeliranje turbulencija se svodi na modeliranje Reynoldsovog tenzora naprežanja za što postoji nekoliko pristupa, od kojih su najčešći bazirani na vrtložnoj viskoznosti i transportu Reynoldsovog naprežanja (Reynoldsove jednačbe).

Neki od modela turbulencije su:

- model sa nula jednačbi (Prandtlov model dužine miješanja)
- Spalart-Almarasov model sa jednom jednačbom
- turbulentni modeli sa dvije jednačbe:
  - Standardni  $k-\varepsilon$  model
  - RNG  $k-\omega$  model
  - Ostvarljiv (Realisable)  $k-\varepsilon$  model
  - $k-\omega$  model.

U okviru ovoga rada provedene su simulacije i diskretizacija parcijalnih diferencijalnih jednačbi primjenom  $k-\varepsilon$  modela turbulencije, koji se ujedno i najčešće koristi u Računalnoj dinamici fluida. Model za strujanje koristi dvije parcijalne diferencijalne jednačbe transporta. Prva transportna jednačba sa oznakom  $k$  se odnosi na kinetičku energiju turbulencije, a druga sa nazivom  $\varepsilon$  se odnosi na stupanj disipacije (promjenu brzine disipacije) kinetičke energije turbulencije [22].

Pretpostavka modela je da je turbulentna viskoznost izotropna, odnosno da je omjer Reynoldsova naprezanja i deformacije jednak u svim smjerovima.

Jednadžba kinetičke energije turbulencije prikazana je jednadžbom (3.2):

$$\frac{dk}{dt} = \frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = - \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P - \varepsilon \quad (3.2)$$

gdje su:

$\frac{dk}{dt}$  – ukupna promjena kinetičke energije turbulencije

$\frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right)$  – difuzijski transport

$P$  – brzina proizvodnje kinetičke energije turbulencije

$\varepsilon$  – brzina disipacije kinetičke energije turbulencije [24].

Jednadžba brzine disipacije kinetičke energije turbulencije prikazana je jednadžbom (3.3):

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = - \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{p\varepsilon}{k} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.3)$$

gdje su:

$\frac{d\varepsilon}{dt}$  – brzina promjene disipacije

$\frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right)$  – difuzijski transport

$C_{\varepsilon 1} \frac{p\varepsilon}{k}$  – brzina proizvodnje disipacije

$C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k}$  – brzina nestajanja disipacije [24].

Turbulentni model  $k$ -  $\varepsilon$  zahtijeva samo početne i rubne uvjete za rješavanje sustava, pa se smatra vrlo jednostavnim. Jedan je od najkorištenijih modela, iako je podosta zahtjevan po pitanju memorije s obzirom na dvije dodatne jednadžbe koje uvodi u proračun.

### **3.4. Navier-Stokesove jednadžbe**

Temelj bilo kojeg problema u Računalnoj dinamici fluida su Navier-Stokesove (NS) jednadžbe kojima se definira strujanje jedno-komponentnog fluida [23]. One se mogu pojednostaviti tako da se zanemari utjecaj viskoznosti čime dobivamo Eulerove jednadžbe, a zanemarivanjem vrtložnosti dobivamo potencijalne jednadžbe.

Dobile su ime po Claude-Luis Navieru i George Gabriel Stokesu, a predstavljaju sustav jednadžbi koji opisuje gibanje čestica fluida kao što su tekućine i plinovi [25]. Te jednadžbe temelje se na pretpostavci da su promjene u momentu (uslijed akceleracije) čestica fluida rezultati promjena u tlaku i disipativnim viskozim silama (unutrašnje trenje fluida) koje se odvijaju unutar fluida [25]. Odnose se na strujanje Newtonskog, jednofaznog fluida (dakle bez kemijske reakcije) i bez utjecaja elektro-magnetskih sila.

### **3.5. Metoda konačnih volumena (MKV)**

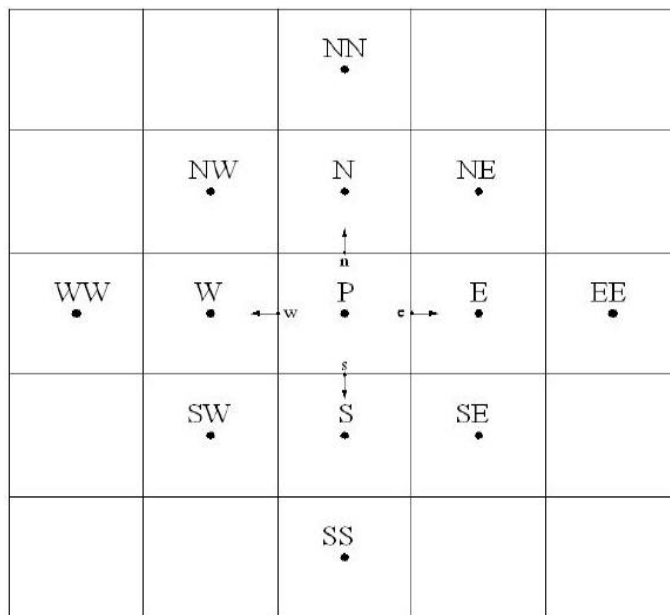
Uz Navier-Stokesove jednadžbe, numerička metoda na kojoj se bazira izračun problema kretanja fluida je prethodno spomenuta metoda konačnih volumena (MKV). Za nju se može reći kako zauzima mjesto između metode konačnih elemenata (MKE) i metode konačnih razlika ili diferencija (MKR), jer se smatra generalizacijom MKR, ali i specijalnim slučajem MKE. Javlja se 1960-ih godina za potrebe računanja problema povezanih sa nuklearnim reaktorima i difuzijama neutrona. 1970-ih godina je zabilježen njezin razvitak za potrebe mehanike fluida, no tek u posljednja tri desetljeća dolazi do njezine popularnosti. Danas se najviše koristi u mehanici fluida, aerodinamici, izradi CFD modela i sl.

Proces diskretizacije sastoji se u tome da se domena podijeli u poddomene, predstavljajući konačan broj volumena koji se međusobno ne preklapaju. Bitno je naglasiti kako je broj poddomena velik, ali konačan. One zapravo predstavljaju ćelije u Ansys kompjuterskim programima. Potom se smješta čvor u težište pojedinog volumena i proračunavaju vrijednosti u istima.

Mrežu konačnih volumena je moguće formirati na dva načina [23]:

1. izradi se mreža volumena i nakon toga se postavljaju čvorovi u težišta ćelija
2. najprije se definiraju položaji čvorova, a nakon toga se stranice konačnih volumena postavljaju na granici između pojedinih ćelija.

Shema definiranja čvorova prikazana je slikom 3.5.



Slika 3.5. Prikaz definiranja numeričke mreže i čvorova [23]

#### **4. NUMERIČKI MODEL ZA HIDRAULIČKU ANALIZU OPSTRUJAVANJA FLUIDA OKO KUGLASTOG ZATVARAČA**

Kao glavni element hidrauličke analize u kompjuterskom programu Ansys CFX 19.1 određen je 3D model cijevnog sustava sa ugrađenim kuglastim zatvaračem, predviđenog kao dio vodoopskrbnog sustava. Unutarnji promjer cijevi iznosi  $D=50$  mm. Zatvarač je smješten na trećini duljine cijevi, te je promjera  $d=75$  mm, dok duljina cijevi od ulaza do zatvarača iznosi 500 mm, odnosno 1000 mm od zatvarača do izlaza cijevi.

Osnovni preduvjet za početak rada u Ansys CFX kompjuterskom programu bila je izrada geometrije modela, za što je postojalo više načina. U sklopu samog programa, točnije u fazi predprocesiranja, postoje dva podprograma čija je funkcija izrada 2D i 3D modela, kao i izmjena i dorada postojećih, a sve u svrhu pripreme istih za naredne faze modeliranja. Podprogrami, točnije DesignModeler i SpaceClaim, približno su jednaki, no ipak imaju neke različitosti, koje su se i ovdje pokazale presudnima za odabir jednog, odnosno drugog podprograma. Dodatna mogućnost je izraditi 3D model u AutoCAD programu, SolidWorks-u ili nekom drugom programu koji nije u sklopu Ansys Workbench programskog paketa, te potom učitati 2D ili 3D model u Ansysov program uz mogućnost njegove dorade u nekom od prethodno spomenutih podprograma.

U ovom slučaju ideja je bila napraviti 3D model u AutoCAD-u, učitati ga u Ansys CFX i potom u SpaceClaim-u ili DesignModeler programu mijenjati stupanj rotacije (položaj zatvarača u odnosu na centralnu os) ovisno o potrebi. Model je iz AutoCAD 2016 importiran u ABViewer 14 besplatni program, gdje je spremljen u .stl format i direktno importiran u Ansys CFX program. Taj je korak bio nužno potreban iz razloga što studentska verzija Ansys programa (Ansys Student 2019 R2) korištena u ovom radu ne podržava uvoz modela čiji je nastavak .dwg, odnosno iz AutoCAD programa. Međutim, to se nije pokazala kao dobra ideja jer je, unatoč činjenici da je model učitani kao cjelina i u SpaceClaimu bio rastavljen na niz komponenti, čime je njegovo daljnje uređivanje bilo onemogućeno. Kao mnogo bolja opcija pokazala se izrada modela u SolidWorks programu i njegov uvoz u CFX program. No, ovdje dolazi do novog problema. Naime, prilikom učitavanja u DesignModeler programu model je tek djelomično bio prikazan. Zaključak je kako je to jedan od nedostataka studentske verzije



Ansyst programskog paketa. Kao rješenje odabran je postupak prebacivanja modela iz Solidworks programa, te njegova dorada u SpaceClaim programu koja je pretežito obuhvaćala rotaciju danog zatvarača. Takav model se sprema i otvara u DesignModeler programu, gdje je njegovu geometriju moguće povećati ili smanjiti, ili pak cijeli model spojiti kao „solid“ u jedno tijelo. Takav model je spreman za daljnji korak predprocesiranja, tzv. „meshiranje“ ili definiranje mreže elemenata, odnosno cjelokupne domene problema.

U idućem koraku cilj je bio postići što finiju numeričku mrežu sa što većim brojem elemenata, koji je u ovoj verziji programskog paketa limitiran na 512 000 elemenata. Dio sustava od najvećeg interesa za hidrodinamičku analizu je upravo onaj oko samog zatvarača, pa je u tom dijelu numerička mreža najgušća. U skladu s time napravljene su iduće promjene:

- smanjena je veličina elemenata (*Element Size*) na 5 mm. Manja veličina elemenata podrazumijeva veći broj istih, a samim time i veću kvalitetu numeričke mreže.
- U obzir je uzet utjecaj infleksije na način da su definirani parametri poput:
  - debljine prvoga sloja: *First layer thickness* = 0,1 mm
  - maksimalni broj slojeva: *Maximum layers* = 10
  - stopa rasta: *Growth rate* = 1,2 .

U svrhu postizanja što boljih i kvalitetnijih rezultata, fokus je bio na utjecaju infleksije na kontaktu cijev-zatvarač-cijev.

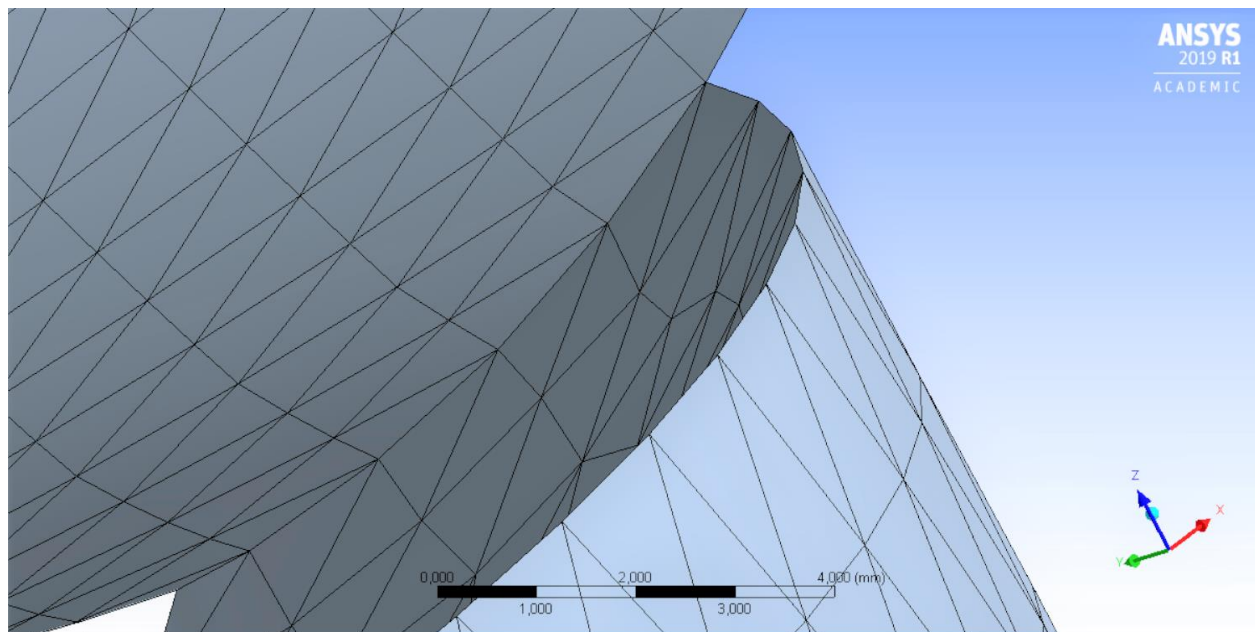
- Veoma je bitno dobiti što kvalitetniju numeričku mrežu ne samo na „stijenci“, odnosno površini cijevi i zatvarača, već unutar kompletnog cijevnog sustava. Dakle, potrebno je da numerička mreža bude izdefinirana duž cijelog promatranog volumena. Iz tog su razloga definirane veličine određenih parametara u opciji „*Face sizing*“. Kako bi se postiglo što bolje prethodno spomenuto volumno definiranje numeričke mreže, bilo je potrebno definirati sferu utjecaja. Radijus definirane sfere obuhvaća područje koncentracije manjih elemenata mreže, odnosno ćelija, ali samim time i njihov veći broj što ujedno znači i mogućnost preciznijeg rješenja. Veći radijus sfere će tako obuhvatiti veće područje promatranog sustava koji će imati kvalitetniju, finiju i gušću numeričku mrežu. Naravno, unutar toga postoje određeni parametri čiji utjecaj može dodatno progustiti mrežu i u konačnici povećati broj elemenata. Takav parametar, koji

je konkretno u ovome slučaju mijenjan, je već prethodno spomenuta veličina elemenata. Naime, definiranjem radijusa sfere utjecaja moguće je reducirati veličinu elemenata u tom području u odnosu na ostatak sustava i na taj način dodatno progustiti mrežu.

Kao neizostavan dio definiranja numeričke mreže svakako treba spomenuti definiranje granica domene. Taj se dio, za razliku od prethodno opisanih stavki, odnosi na kompletan model obuhvaćen hidrauličkom analizom. Ulaz i izlaz („inlet“ i „outlet“) predstavljaju najosnovnije dijelove domene kojima definiramo početak i kraj promatranja strujanja fluida. Domena se sastoji i od unutarnje stijenke cijevi, koja se može opisati plohom koja definira volumen strujanja fluida. U ovom slučaju je to cijev ili „pipe“. I konačno, važno je definirati najbitniji element koji ovu hidrauličku/hidrodinamičku analizu čini složenijom, a ovdje je to zatvarač ili „valve“.

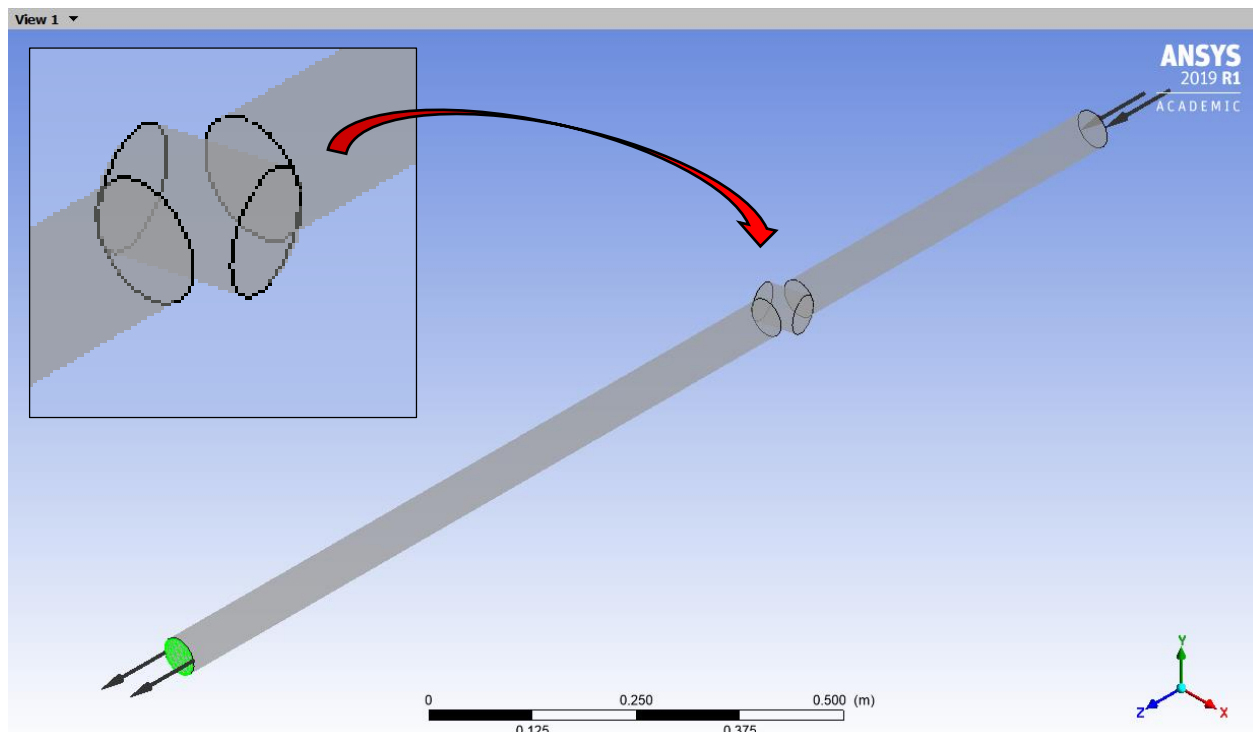
Nakon što su navedene veličine definirane potrebno je izgenerirati numeričku mrežu. Kao rezultat dobije se prikaz sustava sa elementima različitih oblika, pa tako razlikujemo tetraedarsku, heksagonalnu, klinastu i druge mreže elemenata. Veoma je bitno dobro promotriti izgled mreže elemenata s povećanom pažnjom na kontakt cijevi i zatvarača. Osnovni pokazatelj dobro definirane mreže elemenata je pravilno „nalijeganje“ njezinih elemenata. Najjednostavnije rečeno, elementi mreže moraju biti smješteni kao „puzzle“. To bi značilo da bridovi susjednih ćelija moraju ostvariti kontakt u svojoj punoj duljini, ne ostavljajući prazan prostor. Ćelija postavljena sa evidentnim odstupanjem u odnosu na susjednu ukazuje na loše generiranu numeričku mrežu i zahtijeva korekcije u definiranju njezinih elemenata. Ignoriranje takvih pokazatelja dovodi do nemogućnosti pokretanja numeričke simulacije i dobivanja konačnih rezultata.

Na slici 4.1 prikazana je izgenerirana numerička mreža, točnije na kontaktu cijevi i zatvarača gdje se može uočiti prethodno opisano pravilno nalijeganje bridova susjednih ćelija.



Slika 4.1. Izgenerirana numerička mreža na kontaktu zatvarač-cijev

Nakon toga slijedi faza definiranja fizikalnih parametara u numeričkom modelu, što se izvodi u podprogramu „*Setup*“. Prvo slijedi definiranje rubnih uvjeta, odnosno ulaznih i izlaznih vrijednosti pojedinih fizikalnih veličina (Slika 4.2). Definiranje se vrši kako bi se odredio početak i kraj volumena kojim će fluid strujati. Već prilikom izrade numeričkog modela odlučeno je kako će ulaz u cijev biti udaljen 500 mm od kuglastog zatvarača, dok će izlaz biti 1000 mm. Razlog ovim različitim duljinama stoji u tome što je za postizanje kvalitetnijih rezultata (potreba za adekvatnim formiranjem i transportom vrtloga) neophodna veća duljina cijevi nakon zatvarača. Naime, protok vode kroz sustav je takav da će nakon zatvarača nastati vrtlozi (značajne turbulencije). Kako definirani izlaz ne bi utjecao na stvaranje vrtloga u sistemu, potrebno je da se osigura dovoljna duljina koja će to spriječiti.



Slika 4.2. Definirani rubni uvjeti u numeričkom modelu kuglastog zatvarača

Nadalje, definirana je ulazna brzina toka od 1 m/s, a vrijednost relativnog tlaka na izlazu iz sustava iznosi 0 Pa (tečenje fluida sa slobodnim vodnim licem). Osim toga bilo je potrebno definirati i fizikalne karakteristike pojedinih fizikalnih veličina, kao i one što se tiču samog načina provođenja numeričke simulacije. Odabran je jedofazni tip problema, što znači da se susrećemo sa strujanjem jedne vrste fluida, odnosno u ovom slučaju vode. U promatranoj domeni definirani su uvjeti stacionarnog tečenja, gdje je vrijednost referentnog tlaka definirana sa 1 atm (1 atm=101325 Pa), nema temperaturne promjene (izotermalni uvjeti), a odabrani turbulentni model je  $k-\varepsilon$  model. Diskretizacija parcijalnih diferencijalnih jednadžbi vrši se pomoću Upwind sheme [26].

Kao sljedeći korak slijedi faza procesiranja i dobivanja rezultata. Simulaciju pokrećemo u dijelu „*Solution*“. Sukladno sa provođenjem simulacije moguće je uočiti grafički prikaz, te iterativno rješavanje parcijalnih diferencijalnih jednadžbi. Proces se automatski zaustavlja kada se dosegne vrijednost varijable od 0,0001 (predhodno definirana točnost iterativnog postupka – definiranje konvergencije rješenja), što je prikazano slikom 4.3.

# Aleksandra Daić, Hidraulička analiza kuglastih zatvarača primjenom Računalne dinamike fluida, Diplomski rad



Slika 4.3. Iterativni proces obrade podataka i konvergencija rješenja za numerički model

Kao završni korak preostaje otvaranje rezultata u podprogramu „Results“. Ovdje je moguće odabrati fizikalne veličine čiji će rezultati biti prikazani kroz postprocesiranje (obradu i analizu podataka). U ovome slučaju odabrani su: brzina, brzina toka u  $x$ ,  $y$  i  $z$  smjeru, relativni tlak, ukupni tlak, vrtložna viskoznost, kinetička energija turbulencije, promjena tangencijalnih napreznja, vrijednost sile u  $z$  smjeru i dinamička viskoznost. Postoji više načina prikaza rezultata, a neki od njih su: ravninski prikaz (prikaz varijabilnosti pojedine fizikalne veličine kroz određenu ravninu/poprečni presjek), konturni prikaz, vektorski prikaz, prikaz strujanja pomoću strujnica i slično. U ovom radu rezultati pojedinih fizikalnih veličina su prikazani pomoću ravnina i vektora. Definirano je 11 horizontalnih i 18 vertikalnih ravnina sa logički definiranim položajem unutar domene od kojih je sveukupno šest prikazano u sljedećem poglavlju, gdje će biti nešto više riječi o samim rezultatima.

Rezultate obrade podataka pojedinih fizikalnih veličina je također moguće prikazati i pomoću animacija (numeričkih simulacija), pri čemu postoje tri moguća odabira: *Quick*, *Timestep* i *Keyframe Animation*. *Quick* opcija kao najjednostavnija od navedene tri, omogućuje prikaz rezultata fizikalne veličine kroz animaciju od početne do krajnje točke definiranih određenom ravninom, strujnicama i dr. *Timestep* opcija podrazumijeva stvaranje animacije

preko vremenskih koraka, omogućujući tako jednostavan prikaz rezultata. Definira se vrijeme početka animacije, nudeći tako mogućnost prikaza rezultata u vremenu koje nam je od interesa. Posljednja, *Keyframe* opcija omogućuje stvaranje animacije pomoću okvira, tzv. „*keyframe-ova*“. Kao što i sam naziv govori, proces se sastoji u kreiranju okvira. Da bi animacija funkcionirala potrebno je definirati prvi i posljednji okvir, koji definiraju granice svakog odjeljka animacije. Po potrebi se može definirati još okvira, no to nije nužno. U ovome slučaju odabrana je *Keyframe* opcija za stvaranje animacije [26].

U okviru ovoga diplomskog rada provedene su tri varijante: različite po pogledu geometrije, stupnju rotacije zatvarača ili ulazne brzine. Analize su sprovedene na osnovu navedena tri parametra, čije su vrijednosti u određenim varijantama konstantne, dok su u nekima varijabilne.

Prva varijanta podrazumijeva konstantnu geometriju sustava te konstantnu vrijednost ulazne brzine toka  $v=1$  m/s, dok je kuglasti zatvarač rotiran za različite stupnjeve. Promjer cijevi iznosi  $D=50$  mm. Zatvarač je smješten na trećini duljine cijevi, te je promjera  $d=75$  mm, dok duljina cijevi od ulaza do zatvarača iznosi 500 mm, odnosno 1000 mm od zatvarača do izlaza. Zatvarač je u podmodelima rotiran za  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  i  $75^\circ$ .

Druga varijanta podrazumijeva konstantnu geometriju i stupanj rotacije zatvarača od  $45^\circ$ , dok se ulazna brzina toka mijenja i to za vrijednosti: 1,0, 1,2, 1,4, 1,6, 1,8 i 2,0 m/s.

U trećoj varijanti dolazi do promjene geometrije, i to za 50 i 100%. Prvi slučaj razmatra promjer cijevi  $D=100$  mm, a drugi  $D=150$  mm. Povećanjem promjera za određeni postotak povećana je i ukupna duljina cijevi. Razlog tome leži u činjenici da je potrebno osigurati dovoljni prostor za stvaranje vrtloga. Vrtlozi su svakako negativna pojava u cijevnom sustavu, no kako bi u CFX kompjuterskom programu točno definirali njihov položaj i veličinu, potrebno je izbjeći utjecaj na njihovo stvaranje i time prouzročiti netočnost u proračunu. Sukladno tome, duljina cijevi prvog slučaja je 3111,80 mm, s time da duljina prije zatvarača iznosi 1000 mm, a nakon 2000 mm. Promjer kuglastog oblika zatvarača iznosi 111,80 mm. Duljina cijevi u drugom slučaju iznosi 4667,60 mm, gdje duljina prije zatvarača ima vrijednost 1500 mm, a nakon zatvarača 3000 mm. Promjer kuglastog oblika zatvarača iznosi 167,71 mm.

## 5. HIDRAULIČKA ANALIZA I REZULTATI ISTRAŽIVANJA

Kao što je u prethodnom poglavlju opisano, provedene su tri, odnosno četiri varijante hidrauličkog proračuna čiji su ulazni parametri prikazani u tablici 5.1.

Tablica 5.1. Ulazni parametri za provedene varijante hidrauličkog proračuna

Ulazni parametri	Varijanta 1	Varijanta 2	Varijanta 3	
			Podvarijanta 3.1.	Podvarijanta 3.2.
Promjer cijevi $D$ [mm]	50	50	100	150
Brzina toka $v$ [m/s]	1,0	1,0, 1,2, 1,4, 1,6, 1,8, 2,0	1,0	1,0
Stupanj rotacije $\alpha$ [°]	15, 30, 45, 60, 75	45	15, 30, 45, 60, 75	15, 30, 45, 60, 75

U sustavu je definirano 11 horizontalnih i 18 vertikalnih ravnina (ploha na domenu sustava). Za potrebe prikaza rezultata odabrane su tri horizontalne i vertikalne ravnine koje će biti prikazane u nastavku. Omjer njihovog položaja u odnosu na kuglasti zatvarač je jednak, a jedino se duljine na  $y$  i  $z$  osi razlikuju s obzirom na promjenu promjera i duljine cijevi.

### 5.1. Prva varijanta hidrauličkog proračuna

Od ukupno 11, odabrane su tri horizontalne ravnine kojima su prikazane promjene vrijednosti pojedinih fizikalnih veličina u sustavu. To su redom:

- hpl3 → položaj:  $y = -15$  mm
- hpl6 → položaj:  $y = 0$  mm
- hpl9 → položaj:  $y = 15$  mm.

Od 18 vertikalnih ravnina definiranih uzduž sustava, također je odabrano njih tri, a to su redom:

- vpl5 → položaj:  $z = -50$  mm
- vpl8 → položaj:  $z = 0$  mm

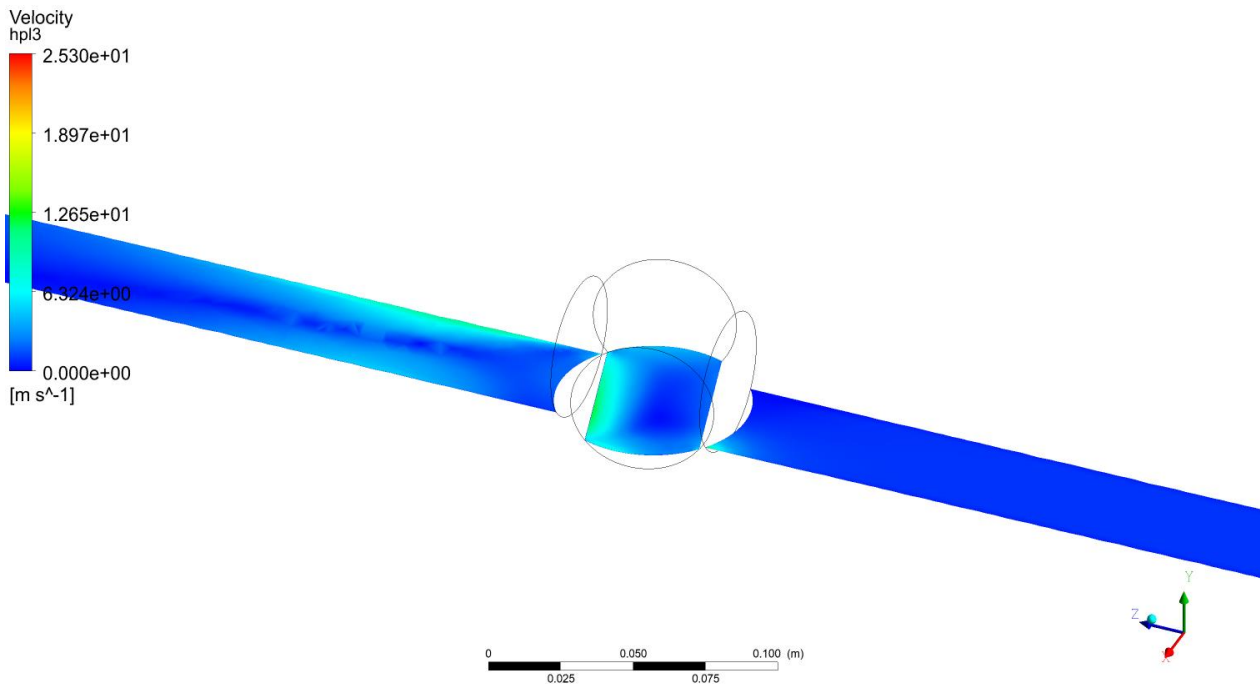
- vpl11 → položaj:  $z = 50$  mm.

U nastavku će biti prikazani i obrazloženi dobiveni rezultati pojedinih fizikalnih veličina koje su se promatrale kroz dani numerički model kuglastog zatvarača.

### 5.1.1. Brzina toka fluida

U nastavku se razmatra promjena brzine u horizontalnom i vertikalnom smjeru, konkretno od -15 mm do +15 mm u  $y$  smjeru, te od -50 mm do +50 mm u  $z$  smjeru. Također, razmatra se što se događa sa promjenom brzine u ovisnosti o svih pet slučajeva rotacije zatvarača:  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  i  $75^\circ$ . Cilj je prikazati što se događa sa brzinom toka fluida u području zatvarača, kao najkritičnijem dijelu cijevnog sustava. Slikama 5.1.a-d – 5.5.a-d prikazane su promjene brzina u ovisnosti o promjeni kuta rotacije.

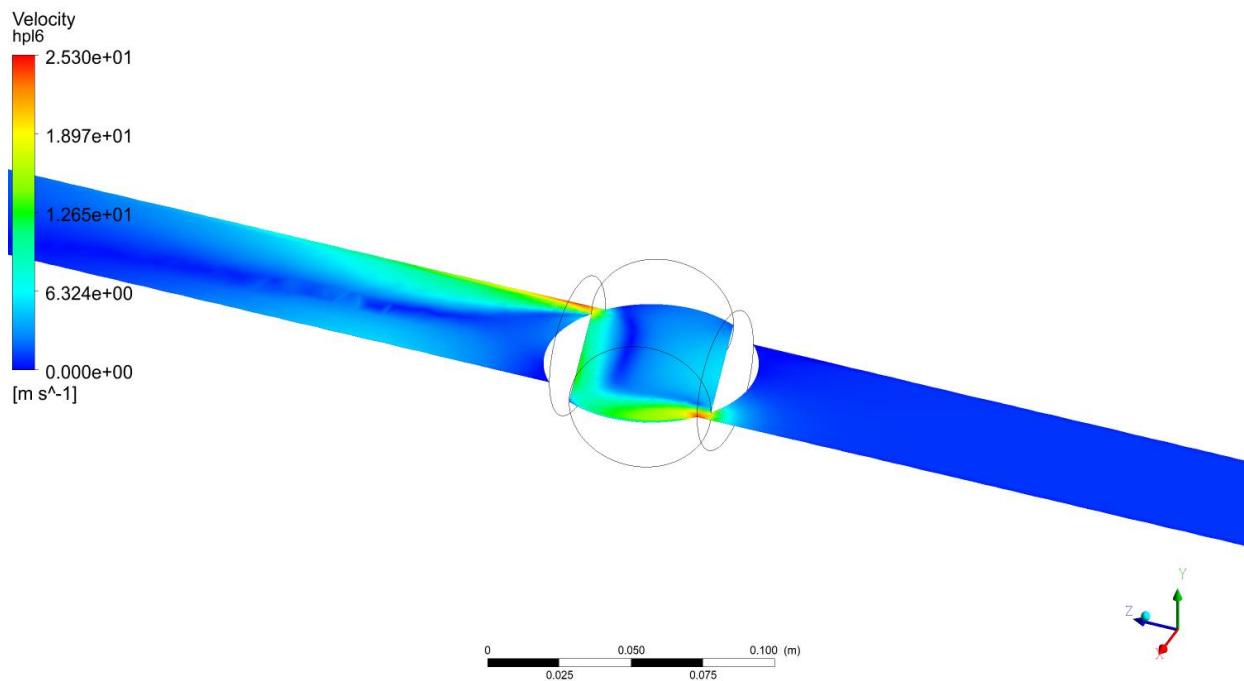
- Rotacija zatvarača za  $15^\circ$  u odnosu na vertikalnu os



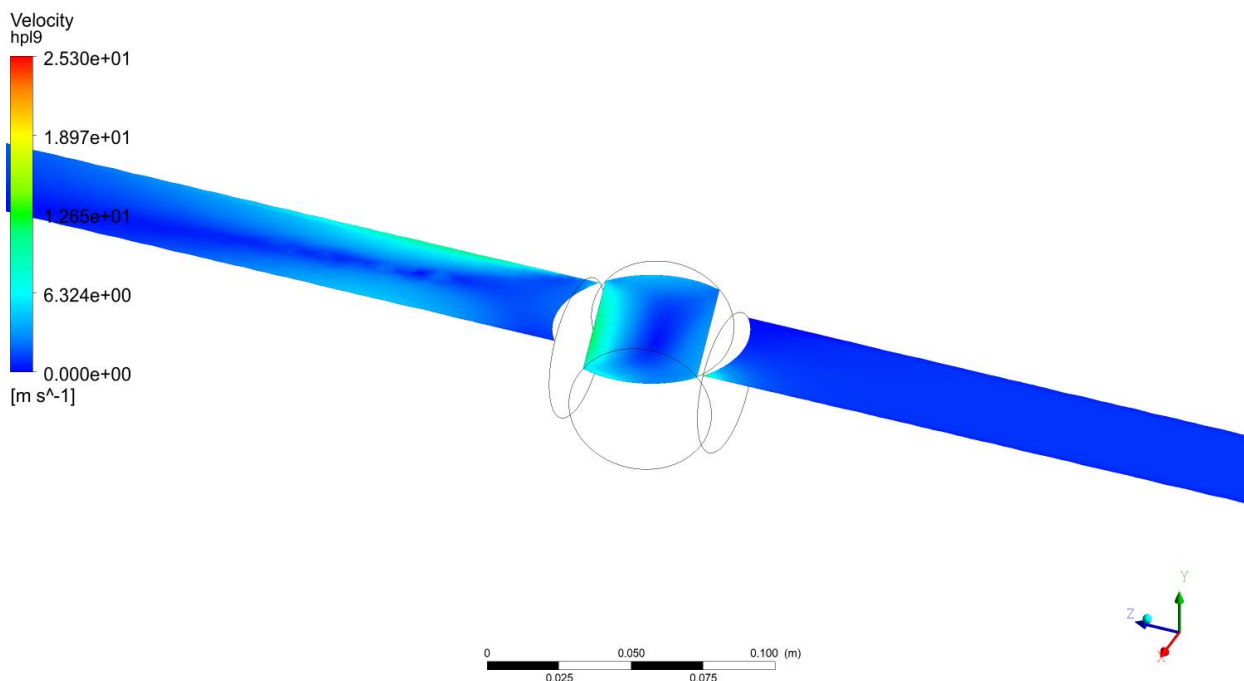
a. Promjena brzine toka  $v$  duž horizontalne ravnine 3

Slika 5.1. a.-d. Promjene brzine  $v$  duž horizontalnih i vertikalnih ravnina za slučaj rotacije zatvarača za  $15^\circ$  u odnosu na vertikalnu os



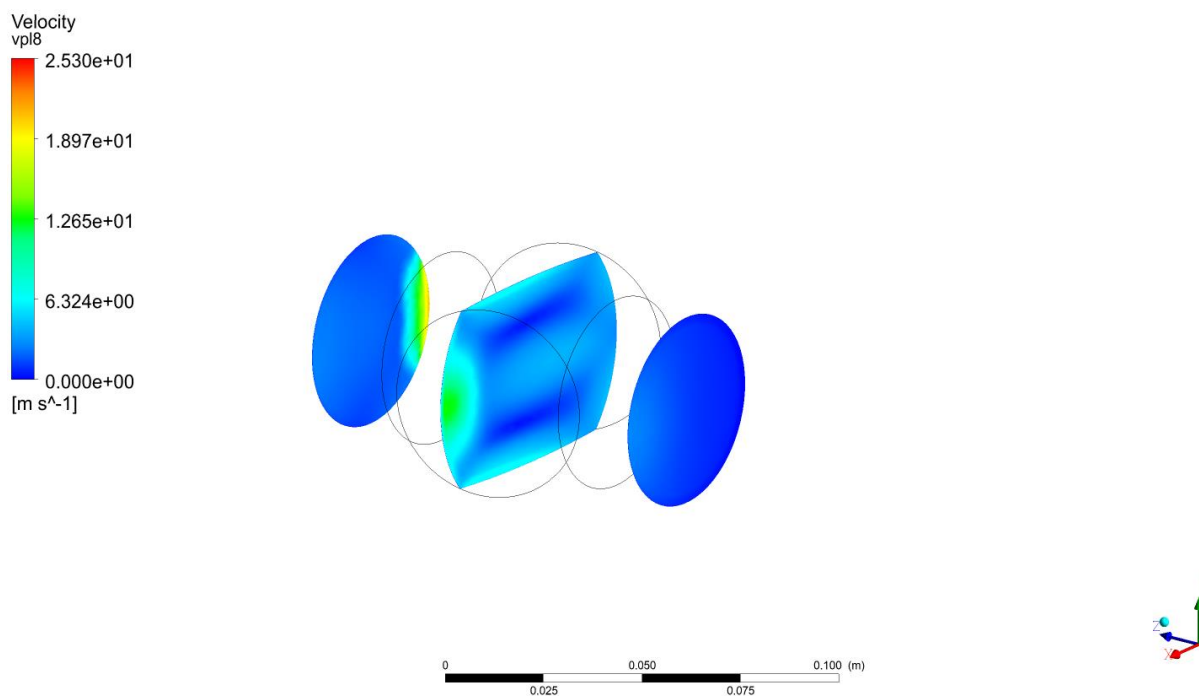


b. Promjena brzine toka  $v$  duž horizontalne ravnine 6



c. Promjena brzine toka  $v$  duž horizontalne ravnine 9

Slika 5.1. a-d. Promjene brzine toka  $v$  duž horizontalnih i vertikalnih ravnina za slučaj rotacije zatvarača za 15° u odnosu na vertikalnu os, nastavak



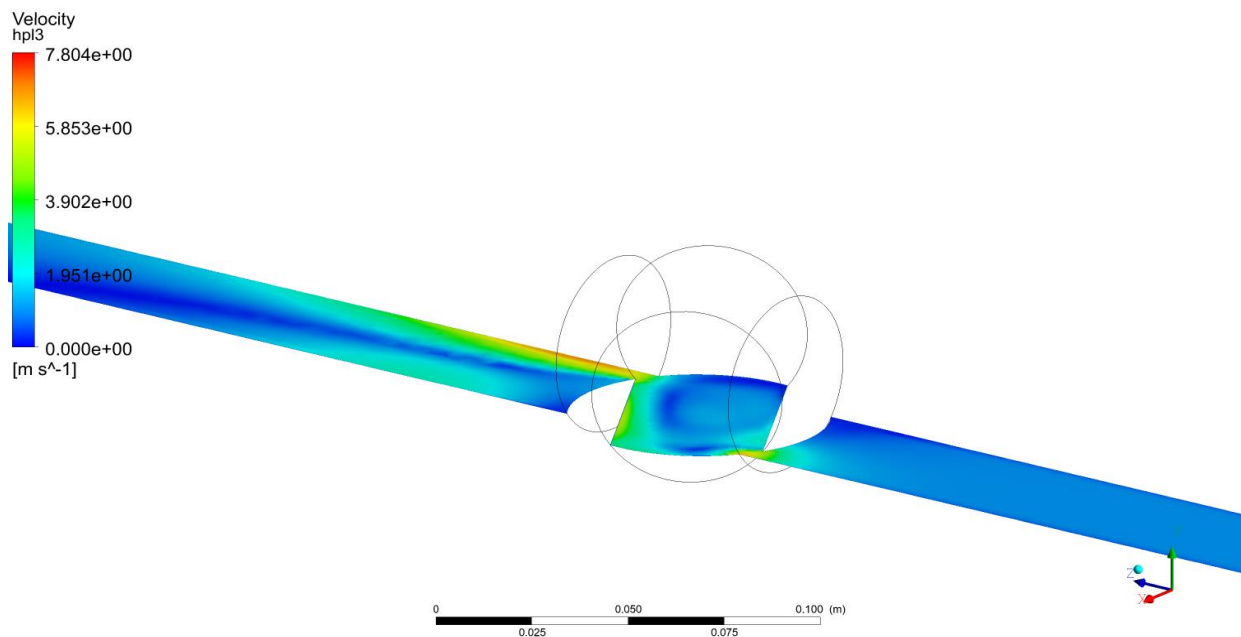
d. Promjena brzine toka  $v$  duž vertikalnih ravnina 5, 8 i 11

Slika 5.1. a.-d. Promjene brzine toka  $v$  duž horizontalnih i vertikalnih ravnina za slučaj rotacije zatvarača za  $15^\circ$  u odnosu na vertikalnu os, nastavak

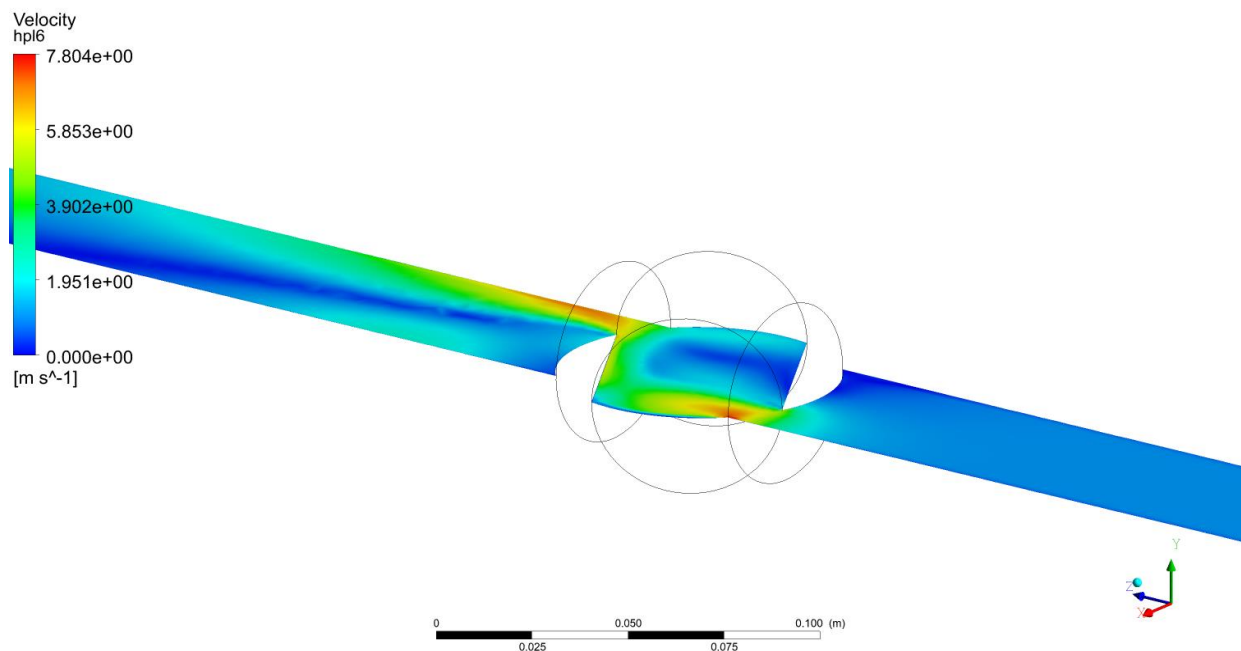
Promjene brzina toka fluida su prikazane duž horizontalne ravnine koja prolazi središtem zatvarača te duž tri poprečna presjeka. Njihov položaj je definiran neposredno ispred, u samom zatvaraču te nakon njega.

Ovaj slučaj rotacije zatvarača je izrazito nestabilan, jer ne postoji prijelazno razdoblje.

- Rotacija zatvarača za  $30^\circ$  u odnosu na vertikalnu os

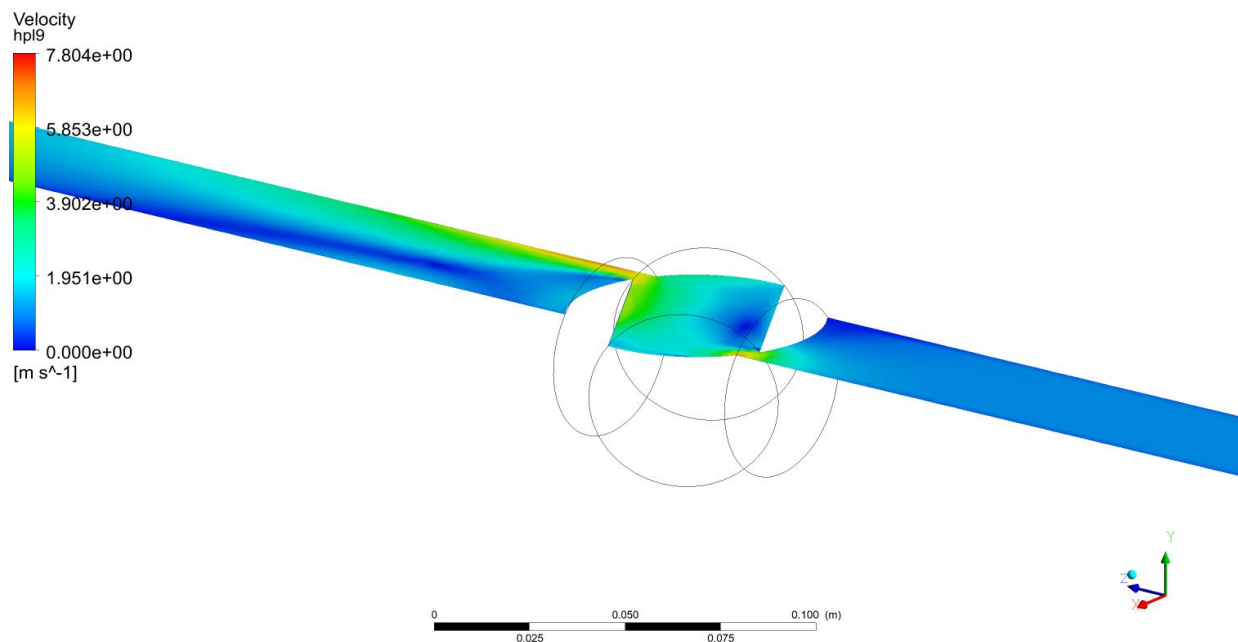


a. Promjena brzine toka  $v$  duž horizontalne ravnine 3

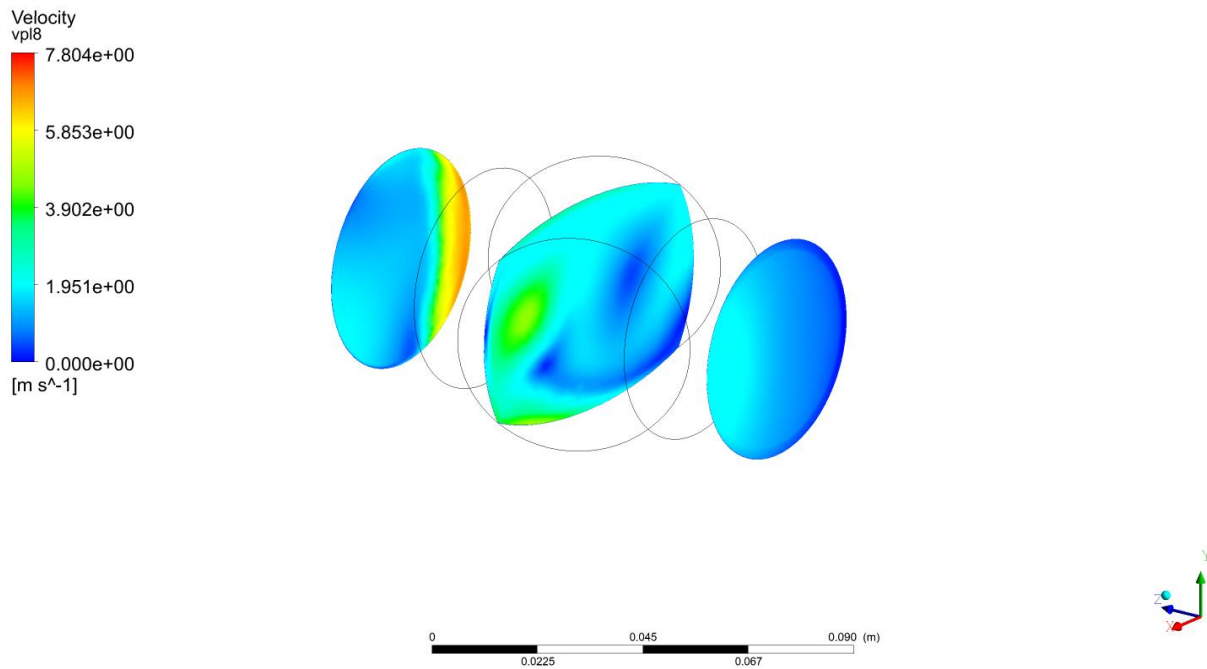


b. Promjena brzine toka  $v$  duž horizontalne ravnine 6

Slika 5.2. a.-d. Promjene brzine toka  $v$  duž horizontalnih i vertikalnih ravnina za slučaj rotacije zatvarača za  $30^\circ$  u odnosu na vertikalnu os



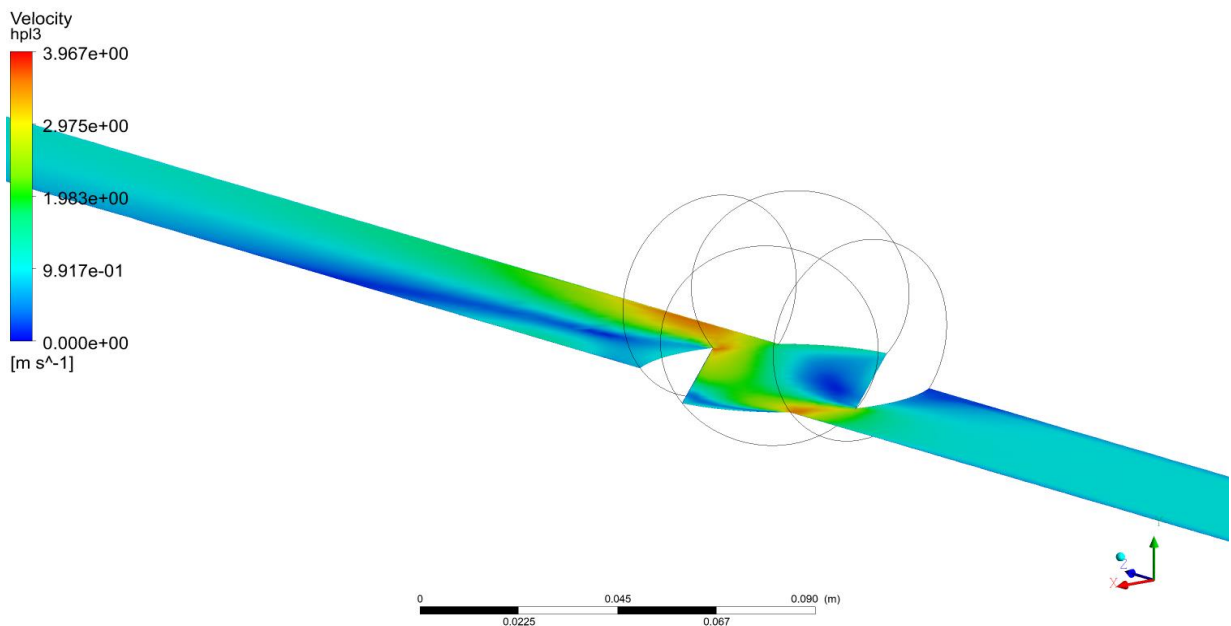
c. Promjena brzine toka  $v$  duž horizontalne ravnine 9



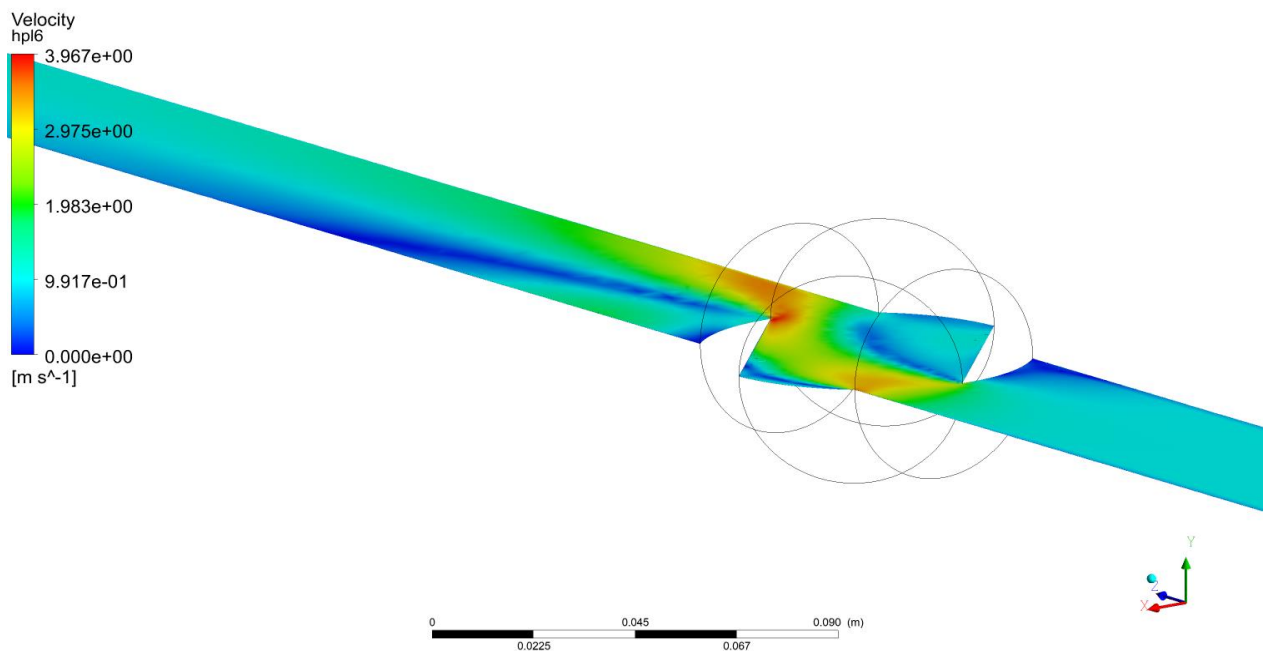
d. Promjena brzine toka  $v$  duž vertikalnih ravnina 5, 8 i 11

Slika 5.2. a.-d. Promjene brzine toka  $v$  duž horizontalnih i vertikalnih ravnina za slučaj rotacije zatvarača za 30° u odnosu na vertikalnu os, nastavak

- Rotacija zatvarača za  $45^\circ$  u odnosu na vertikalnu os

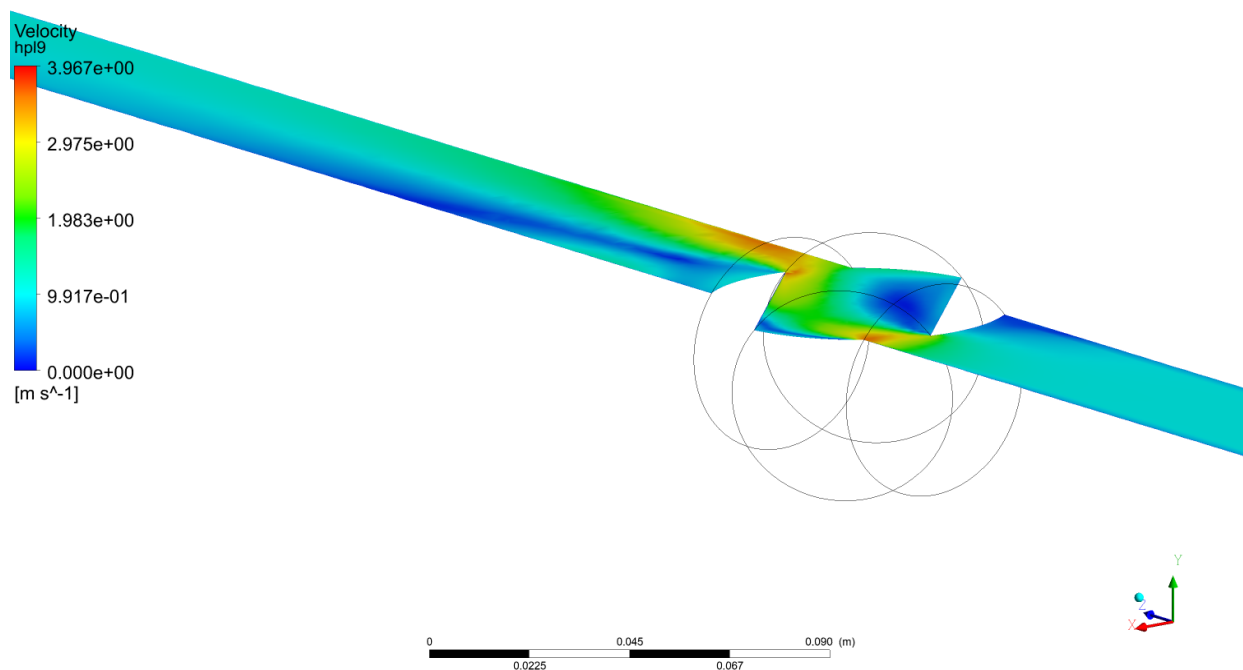


a. Promjena brzine toka  $v$  duž horizontalne ravnine 3

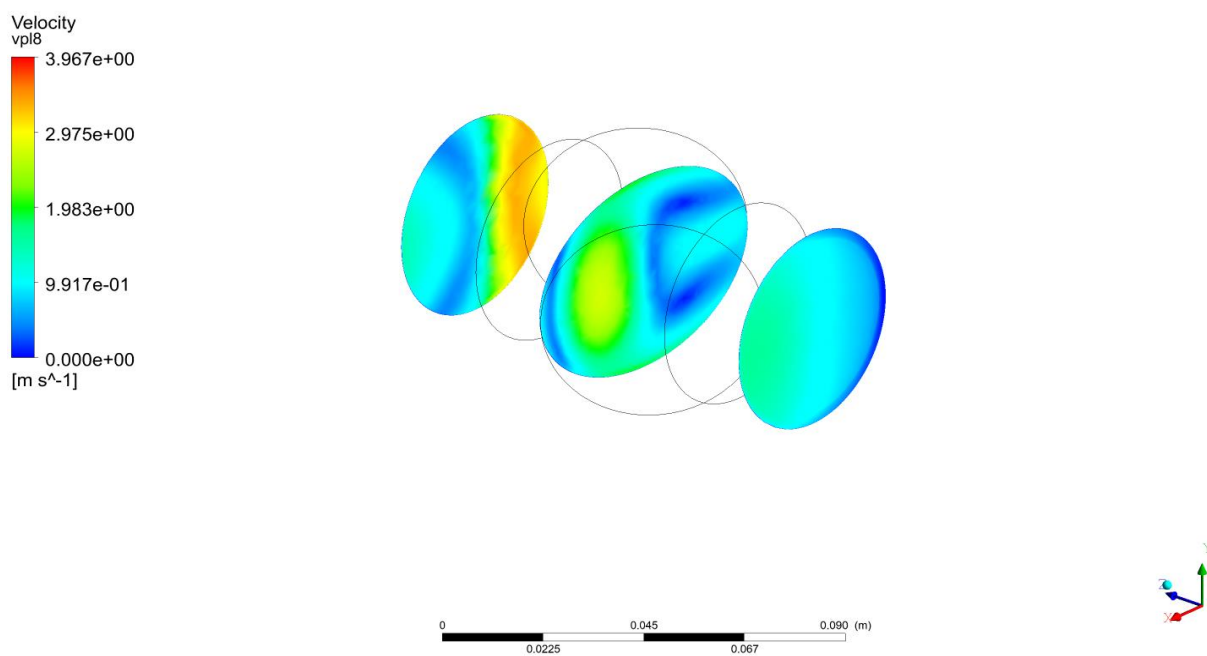


b. Promjena brzine toka  $v$  duž horizontalne ravnine 6

Slika 5.3. a.-d. Promjene brzine toka  $v$  duž horizontalnih i vertikalnih ravnina za slučaj rotacije zatvarača za  $45^\circ$  u odnosu na vertikalnu os



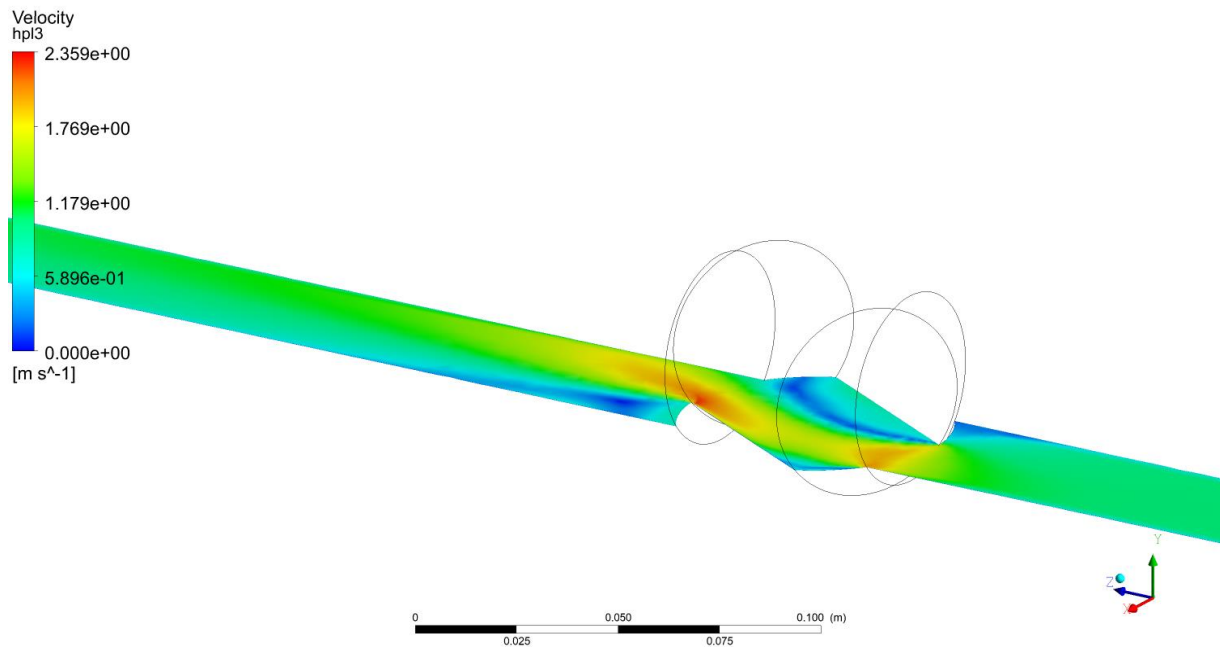
c. Promjena brzine toka  $v$  duž horizontalne ravnine 9



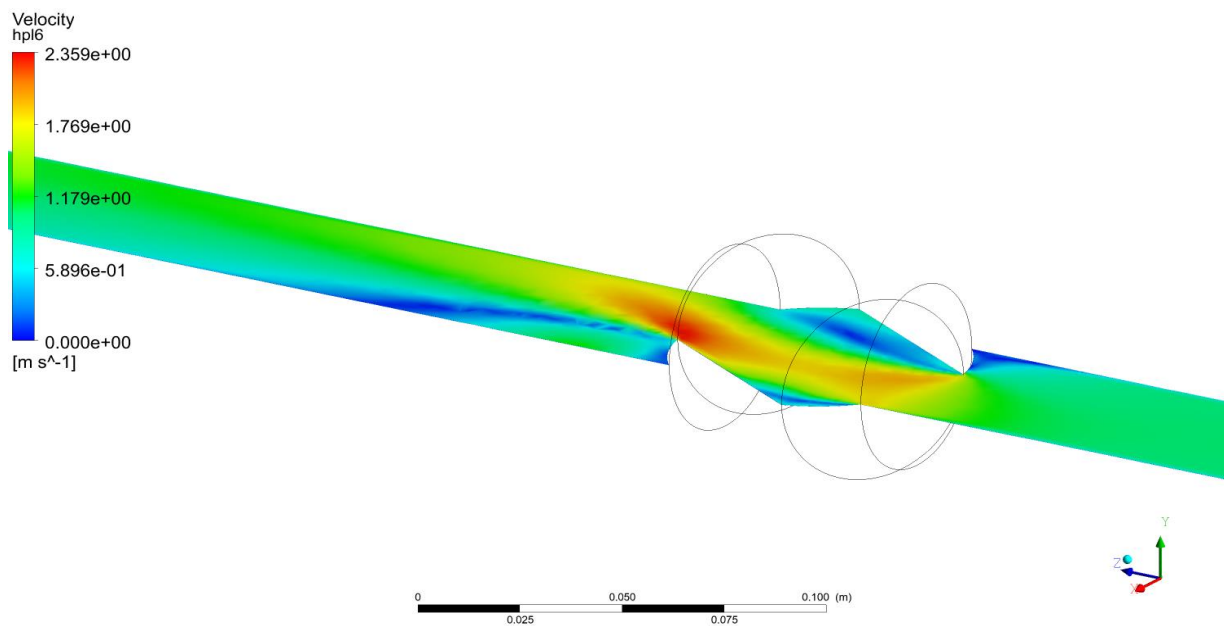
d. Promjena brzine toka  $v$  duž vertikalnih ravnina 5, 8 i 11

Slika 5.3. a.-d. Promjene brzine toka  $v$  duž horizontalnih i vertikalnih ravnina za slučaj rotacije zatvarača za 45° u odnosu na vertikalnu os, nastavak

- Rotacija zatvarača za  $60^\circ$  u odnosu na vertikalnu os

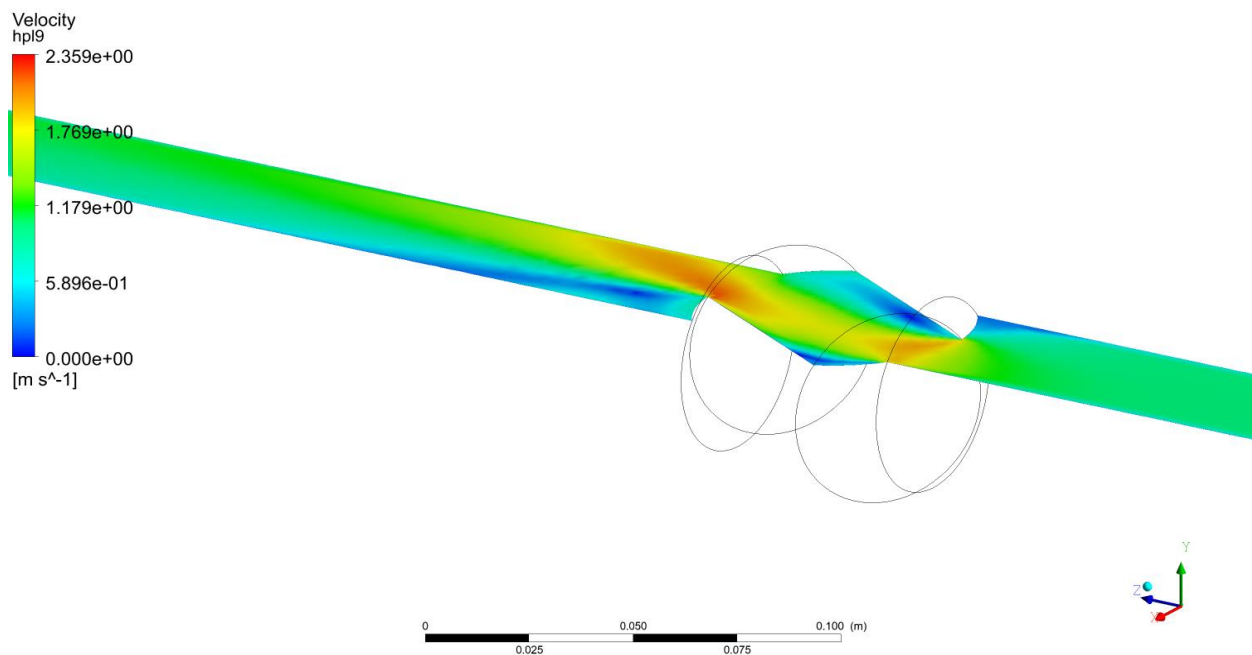


a. Promjena brzine toka  $v$  duž horizontalne ravnine 3

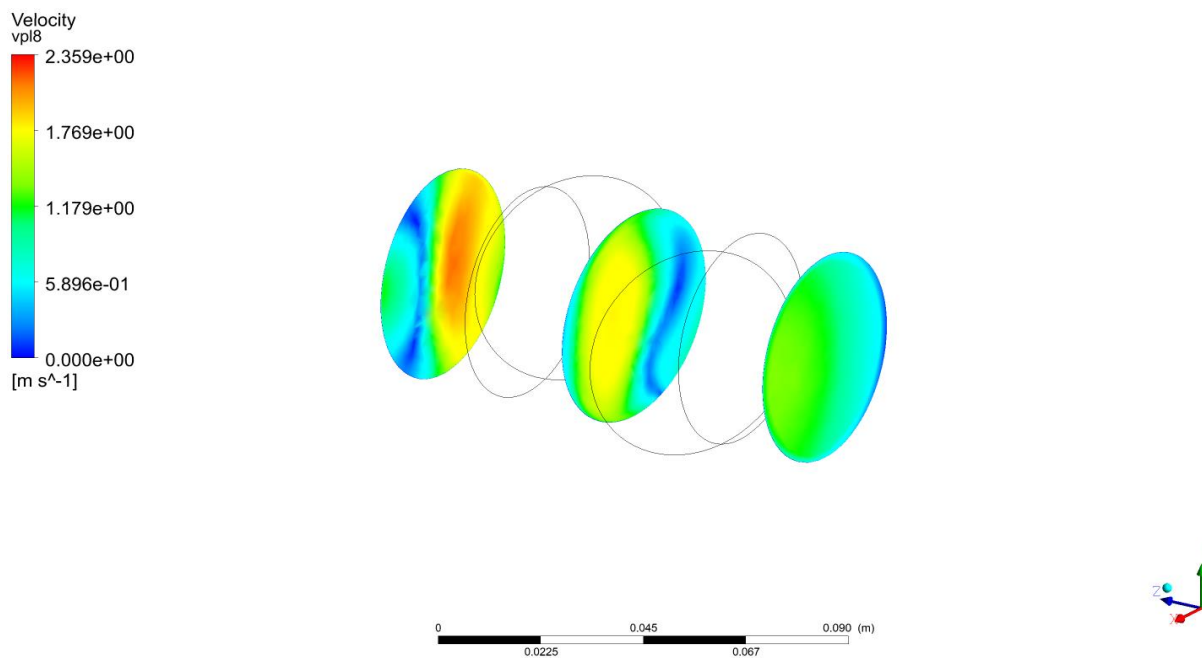


b. Promjena brzine toka  $v$  duž horizontalne ravnine 6

Slika 5.4. a.-d. Promjene brzine toka  $v$  duž horizontalnih i vertikalnih ravnina za slučaj rotacije zatvarača za  $60^\circ$  u odnosu na vertikalnu os



c. Promjena brzine toka  $v$  duž horizontalne ravnine 9

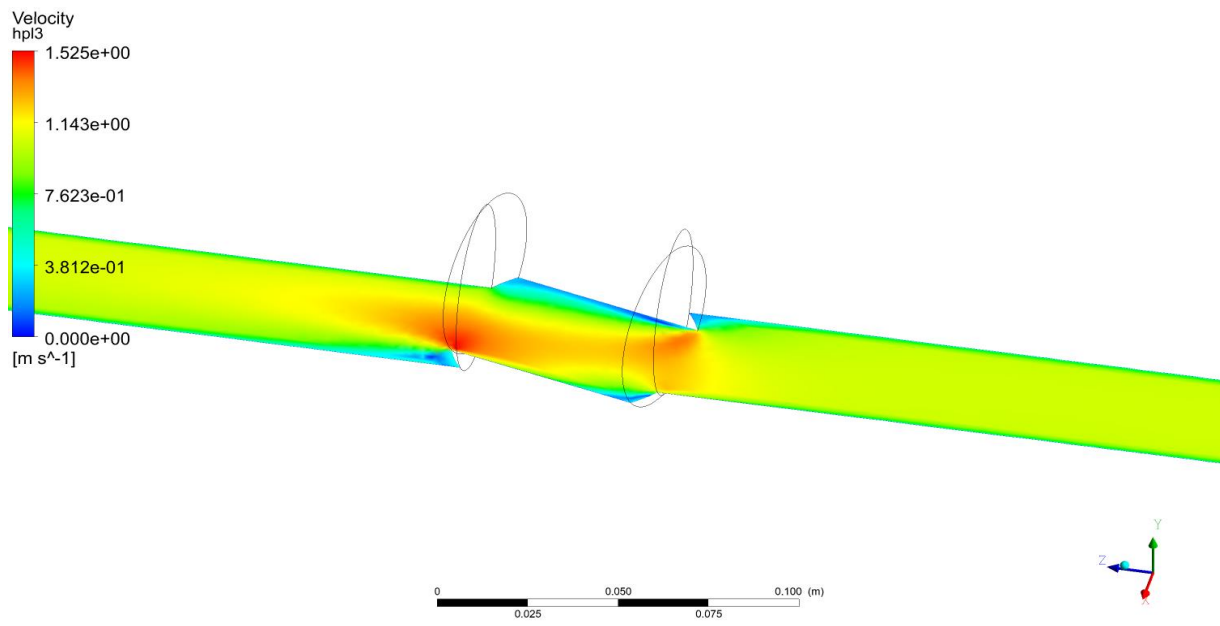


d. Promjena brzine toka  $v$  duž vertikalnih ravnina 5, 8 i 11

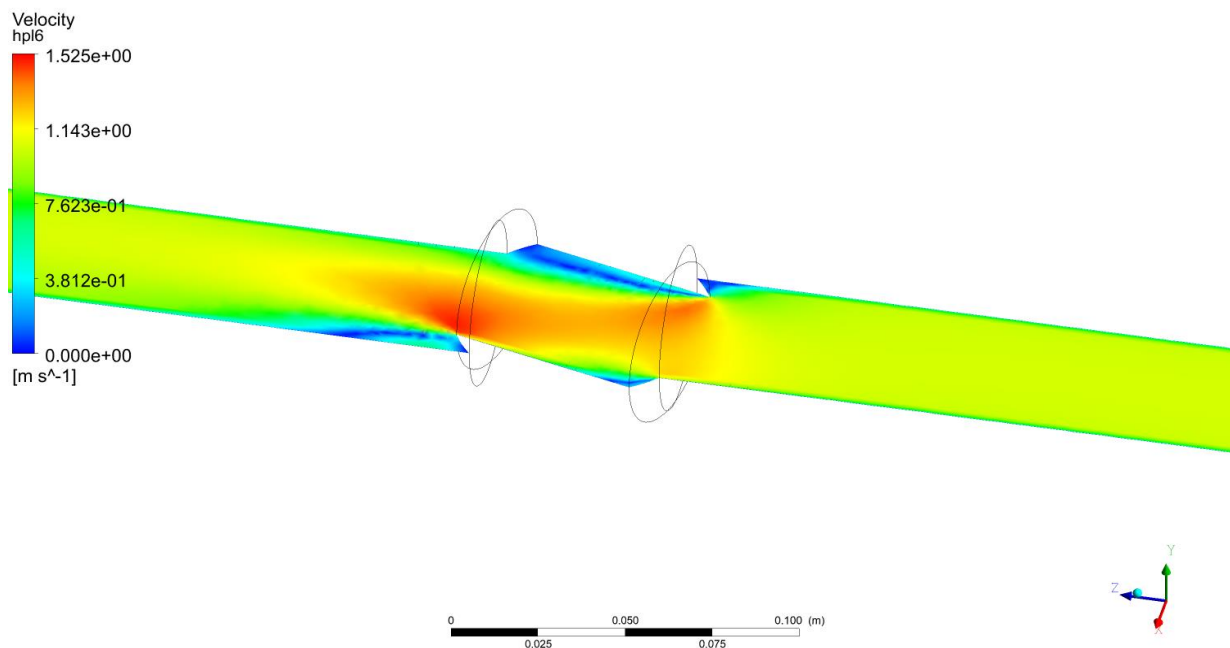
Slika 5.4. a.-d. Promjene brzine toka  $v$  duž horizontalnih i vertikalnih ravnina za slučaj rotacije zatvarača za 60° u odnosu na vertikalnu os, nastavak



- Rotacija zatvarača za  $75^\circ$  u odnosu na vertikalnu os

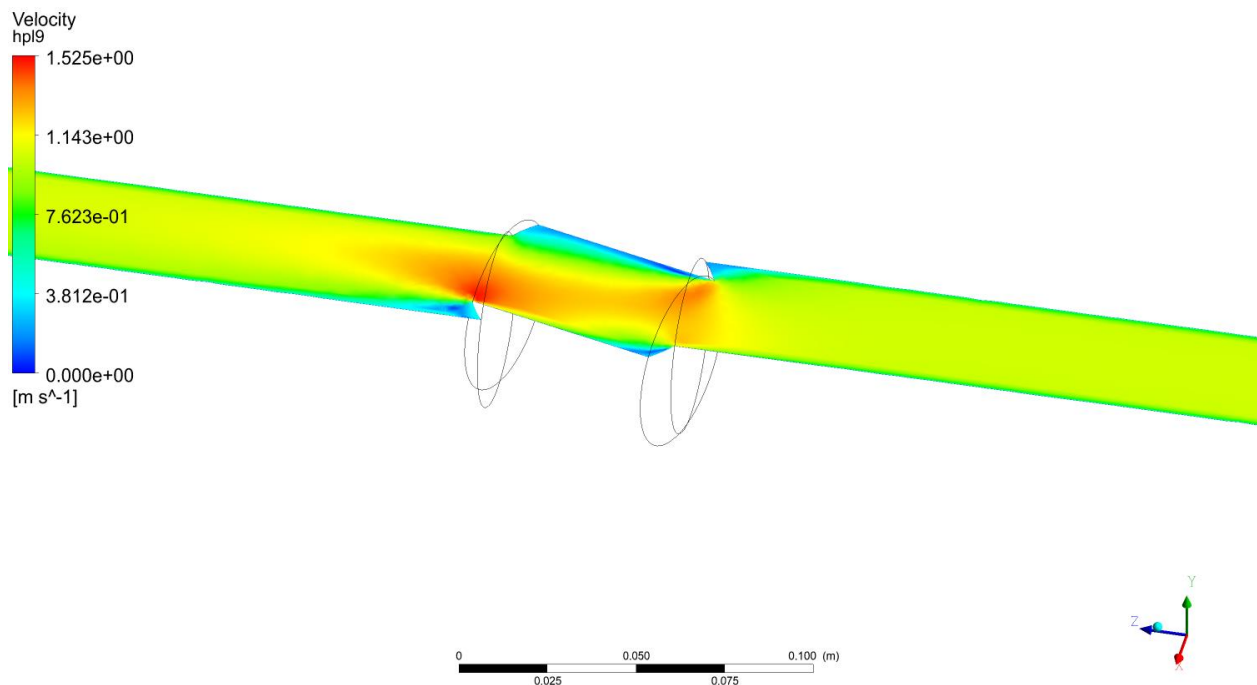


a. Promjena brzine toka  $v$  duž horizontalne ravnine 3

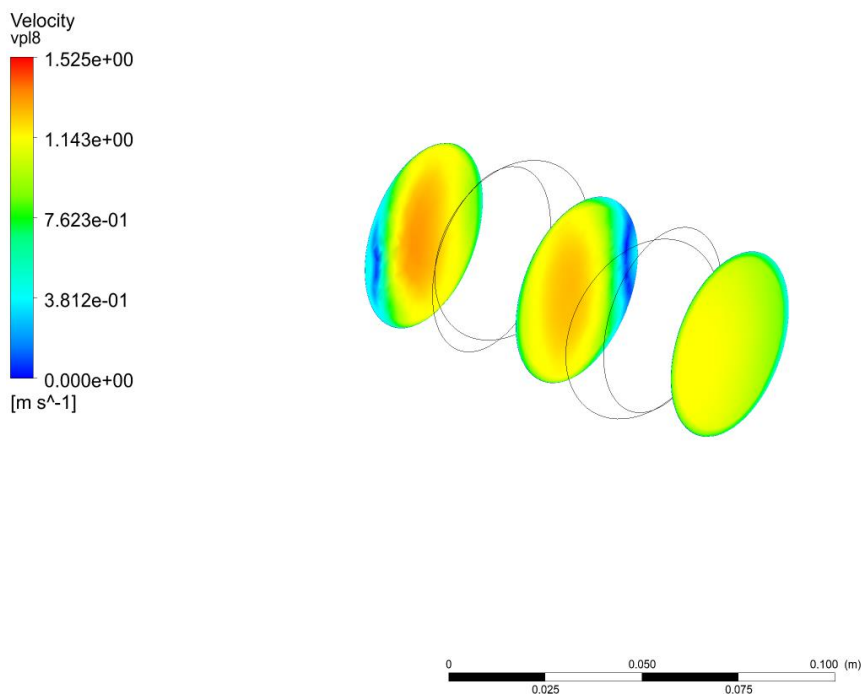


b. Promjena brzine toka  $v$  duž horizontalne ravnine 6

Slika 5.5. a.-d. Promjene brzine toka  $v$  duž horizontalnih i vertikalnih ravnina za slučaj rotacije zatvarača za  $75^\circ$  u odnosu na vertikalnu os



c. Promjena brzine toka  $v$  duž horizontalne ravnine 9



d. Promjena brzine toka  $v$  duž vertikalnih ravnina 5, 8 i 11

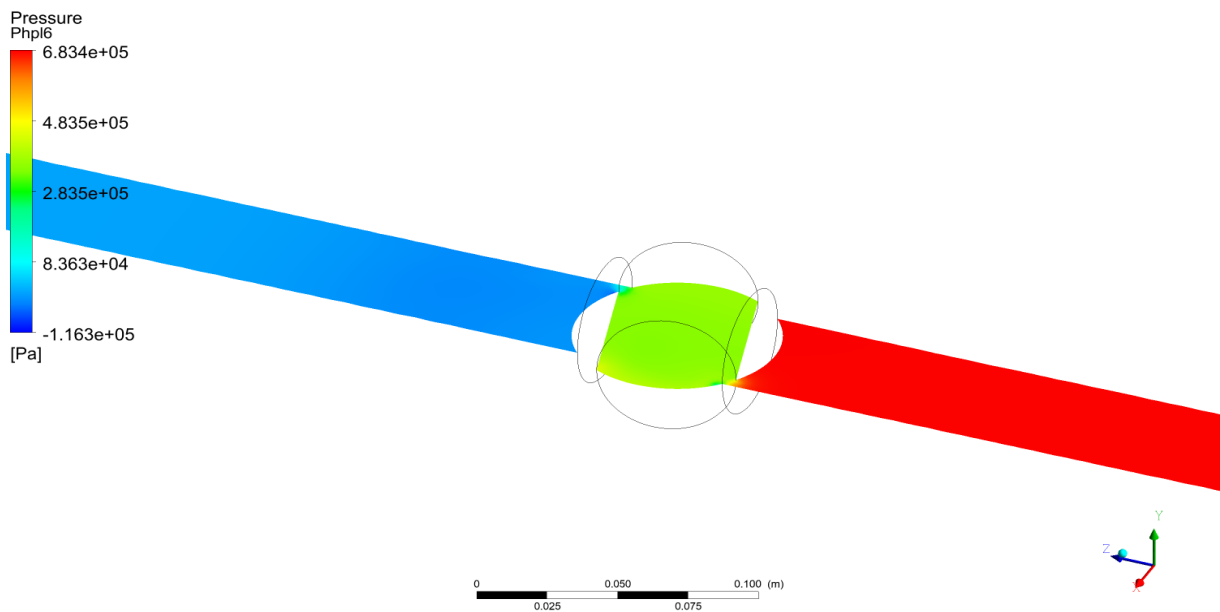
Slika 5.5. a.-d. Promjene brzine toka  $v$  duž horizontalnih i vertikalnih ravnina za slučaj rotacije zatvarača za 75° u odnosu na vertikalnu os, nastavak

Podjelom domene na niz horizontalnih i vertikalnih ravnina dobiven je prikaz promjene brzine duž istih. Vrijednost brzine toka se od ulaznih 1 m/s povećava do određene vrijednosti u zavisnosti stupnja rotacije. Početno stanje podrazumijeva zatvarač postavljen u položaj koji onemogućuje prolazak vode kroz isti. Taj slučaj nije zanimljiv za hidrauličku analizu, stoga ovdje o njemu neće biti riječi. Prvi podmodel se sastoji od rotiranja zatvarača oko njegove centralne vertikalne osi za  $15^\circ$  u smjeru suprotno kazaljke na satu, budući da se zatvaranje i odvija na taj način. Daljnjim rotiranjem dobiven je drugi podmodel sa stupnjem rotacije od  $30^\circ$  (slika 5.2. a-d) u odnosu na početno stanje, kao i ostali podmodeli zarotirani za  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  i  $75^\circ$ , prikazani na slikama 5.3. a-d do 5.5. a-d. Od svih navedenih, najveće brzine su zabilježene u prvom podmodelu, ali sa najmanjom koncentracijom duž ravnine. Razlog pojavi najveće vrijednosti upravo u tom podmodelu se vrlo jednostavno može objasniti jednadžbom kontinuiteta, opisanom formulama (2.1) i (2.2) iz drugog poglavlja. Naime, sustavom prolazi određena količina vode, odnosno protok. Na bilo kojem dijelu sustava mora proći jednaka količina vode, što znači da će protok biti jednak neovisno o promjeni poprečnog presjeka sustava. Što je sustav više otvoren, manja je razlika u površini između poprečnog presjeka cijevi i „kritičnog dijela“ na kontaktu cijev-zatvarač. Manja razlika u površinama znači veći poprečni presjek na području od veće važnosti za hidrauličku analizu, a to ujedno znači manju brzinu toka. Dakle, što je zatvarač zakrenut za veći stupanj to je veća površina poprečnog presjeka, a manja brzina toka.

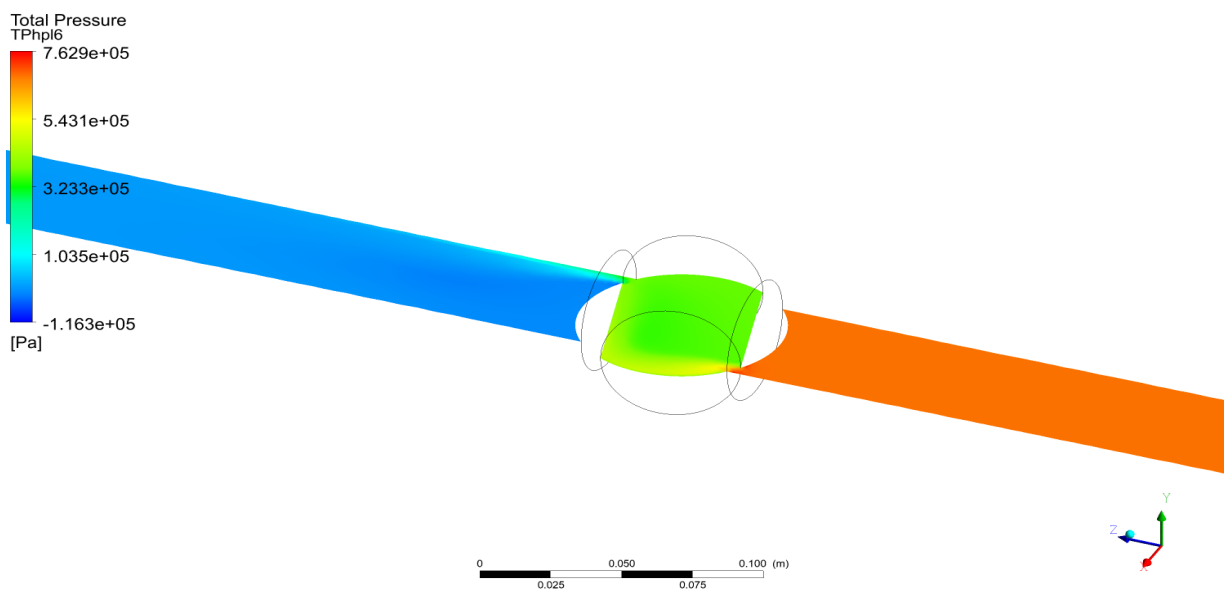
### **5.1.2. Relativni i ukupni tlak**

U nastavku se razmatra promjena relativnog i ukupnog tlaka u horizontalnom i vertikalnom smjeru, od -15 mm do +15 mm u y smjeru te od -50 mm do + 50 mm u z smjeru. Također, razmatra se što se događa sa promjenom oba tlaka u ovisnosti o svih pet slučajeva rotacije zatvarača:  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  i  $75^\circ$ . Cilj je prikazati kako se relativni i ukupni tlakovi mijenjaju u području zatvarača, kao najkritičnijem dijelu cijevnog sustava. Slikama 5.6. a-b – 5.10. a-b prikazane su promjene relativnog i ukupnog tlaka u ovisnosti o promjeni kuta rotacije zatvarača. Rezultati su prikazani duž horizontalno položene ravnine koja prolazi središtem zatvarača. Pretpostavka je kako će vrijednosti tlaka biti najveće neposredno prije zatvarača, uz postepeno smanjenje vrijednosti proporcionalno povećanju kuta rotacije.

- Rotacija zatvarača za  $15^\circ$  u odnosu na vertikalnu os



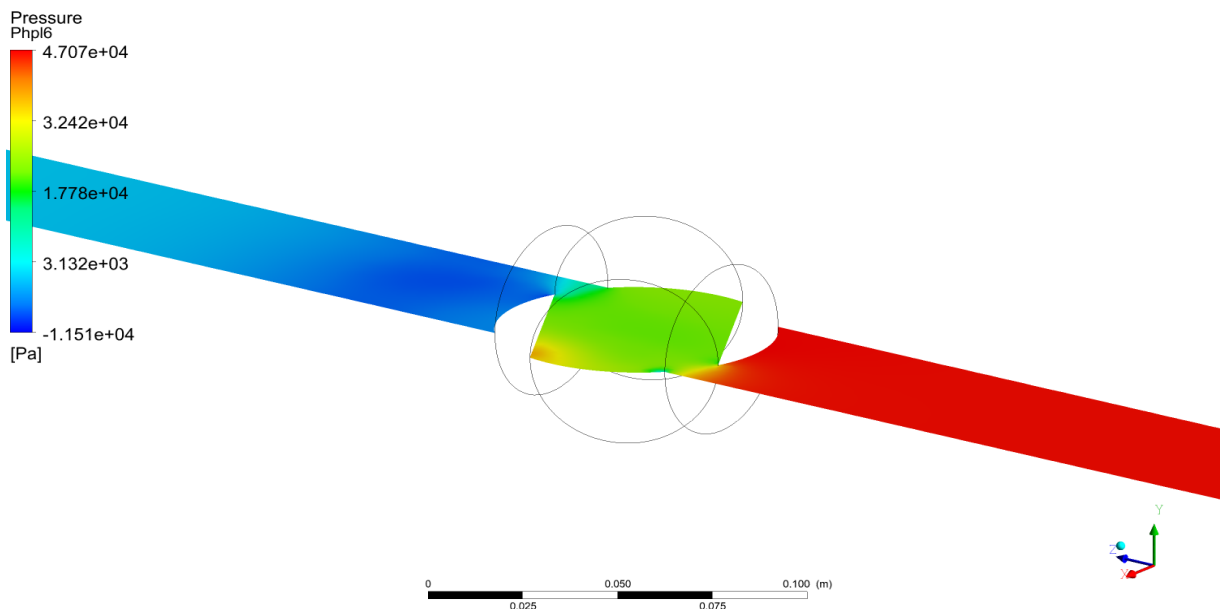
a. Promjena relativnog tlaka  $p$  duž horizontalne ravnine 6



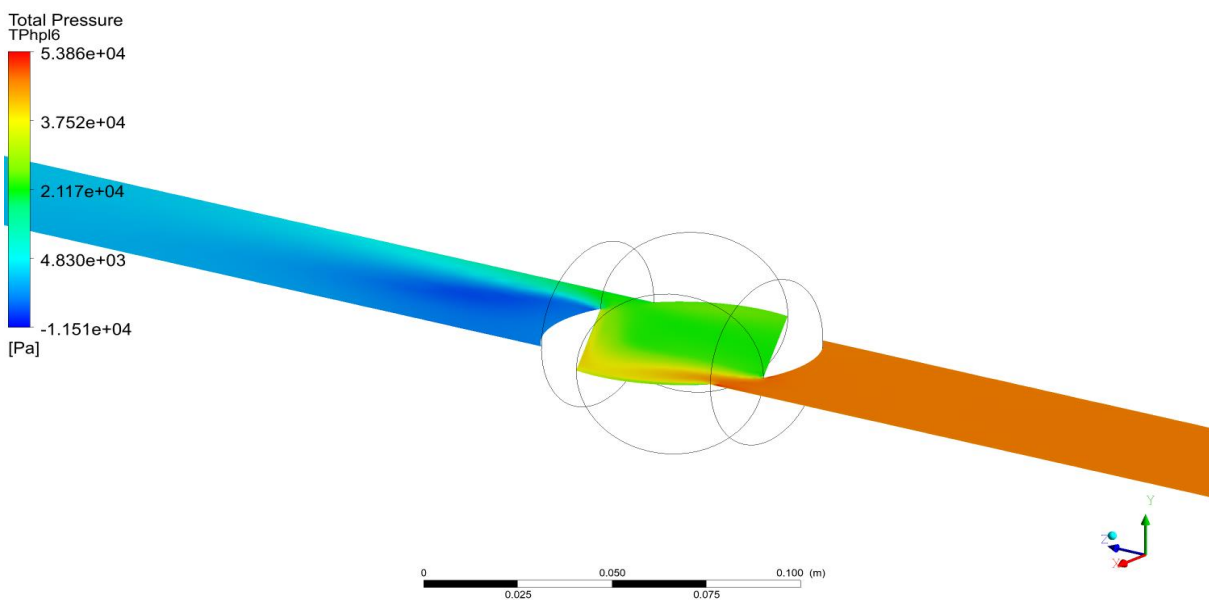
b. Promjena ukupnog tlaka  $p_t$  (eng. total pressure) duž horizontalne ravnine 6

Slika 5.6. a.-b. Promjene relativnog  $p$  i ukupnog tlaka  $p_t$  duž horizontalne ravnine za slučaj rotacije zatvarača za  $15^\circ$  u odnosu na vertikalnu os

- Rotacija zatvarača za  $30^\circ$  u odnosu na vertikalnu os



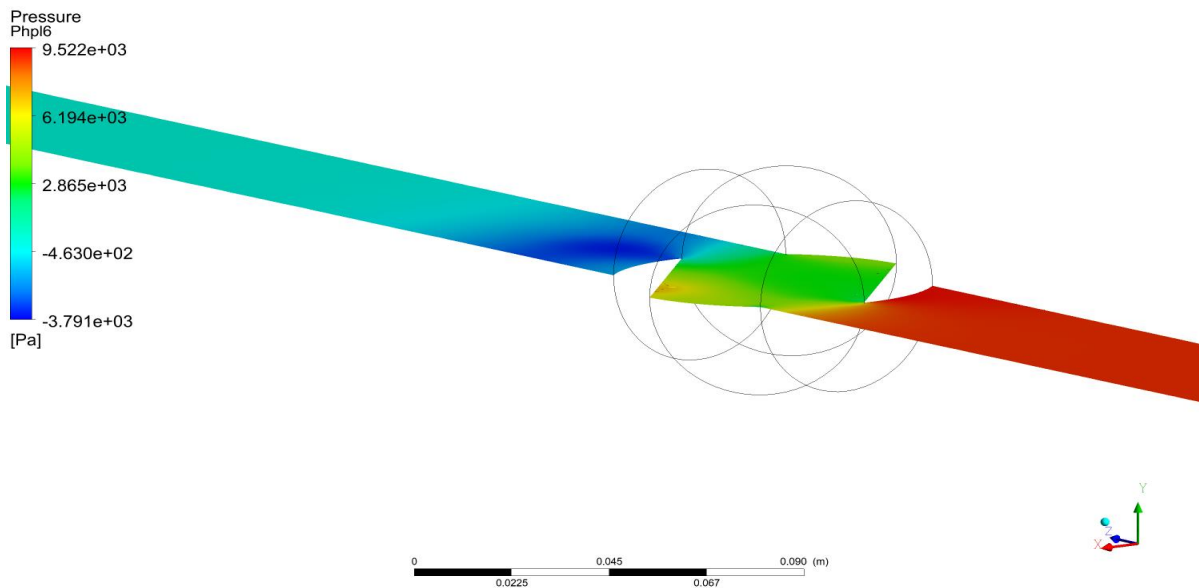
a. Promjena relativnog tlaka  $p$  duž horizontalne ravnine 6



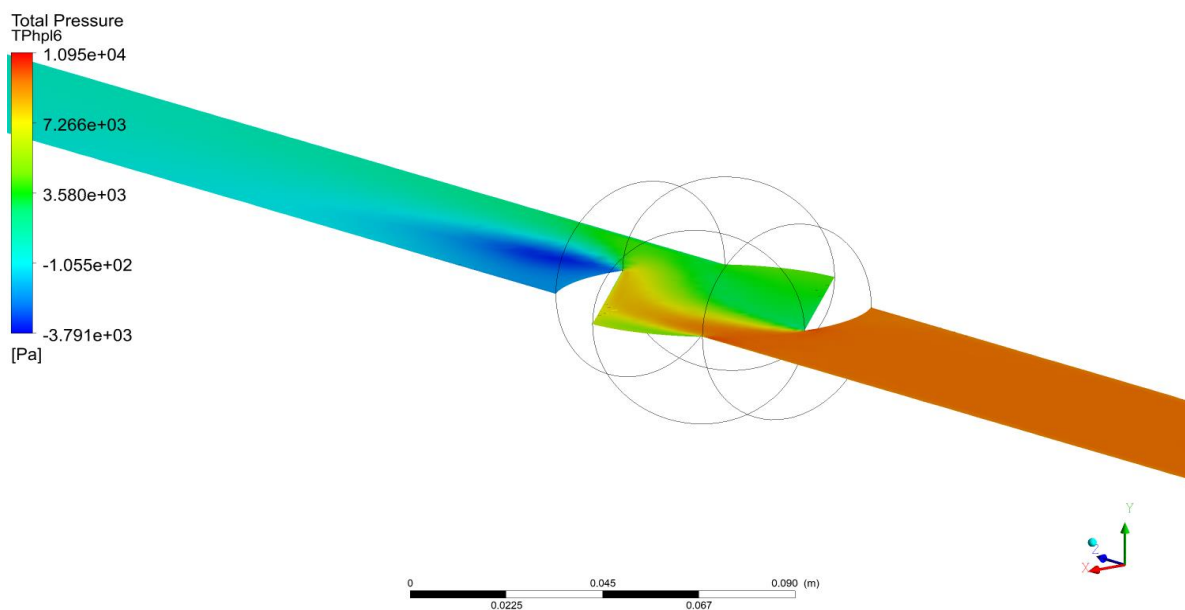
b. Promjena ukupnog tlaka  $p_t$  duž horizontalne ravnine 6

Slika 5.7. a.-b. Promjene relativnog  $p$  i ukupnog tlaka  $p_t$  duž horizontalne ravnine za slučaj rotacije zatvarača za  $30^\circ$  u odnosu na vertikalnu os

- Rotacija zatvarača za  $45^\circ$  u odnosu na vertikalnu os



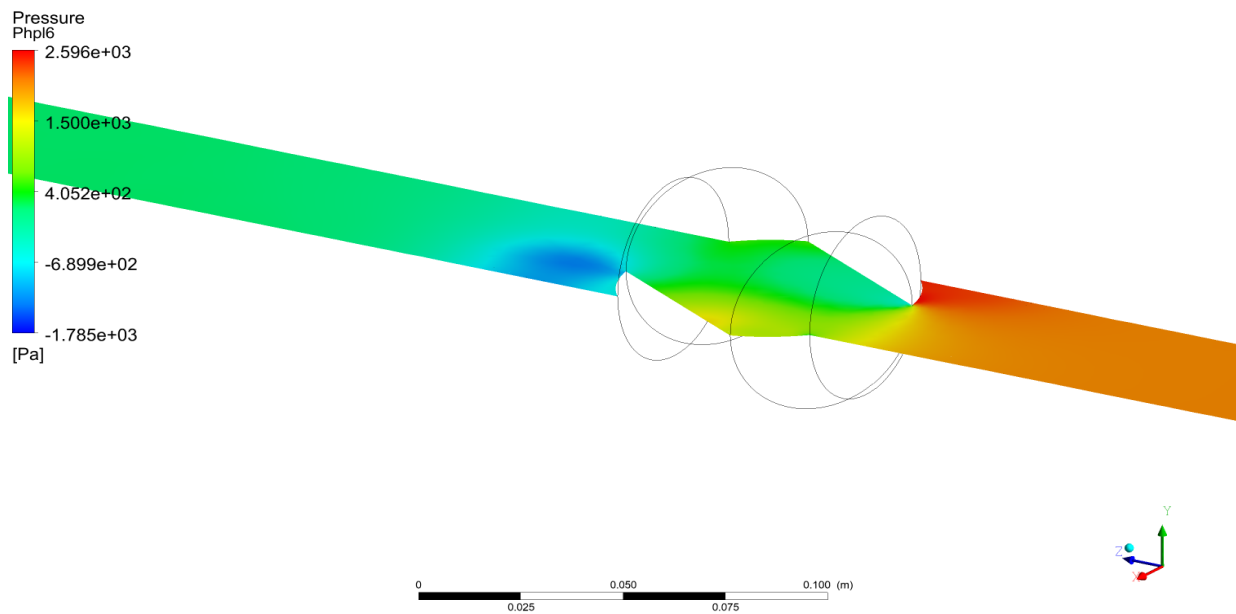
a. Promjena relativnog tlaka  $p$  duž horizontalne ravnine 6



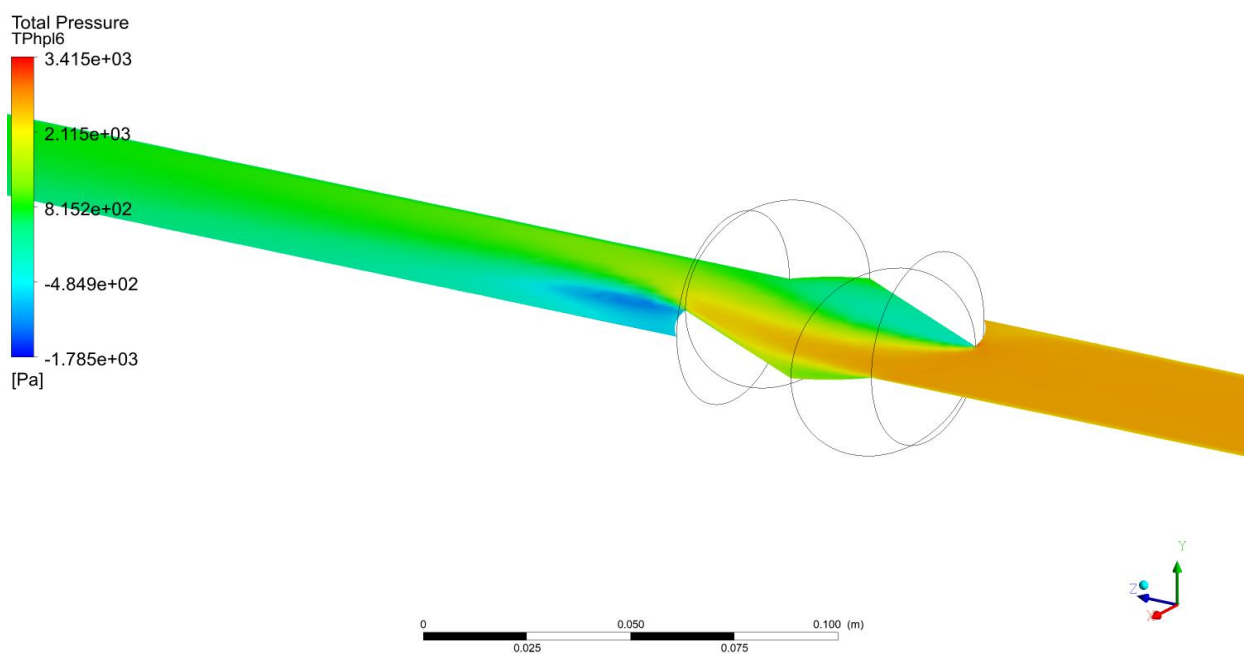
b. Promjena ukupnog tlaka  $p_t$  duž horizontalne ravnine 6

Slika 5.8. a.-b. Promjene relativnog  $p$  i ukupnog tlaka  $p_t$  duž horizontalne ravnine za slučaj rotacije zatvarača za  $45^\circ$  u odnosu na vertikalnu os

- Rotacija zatvarača za  $60^\circ$  u odnosu na vertikalnu os



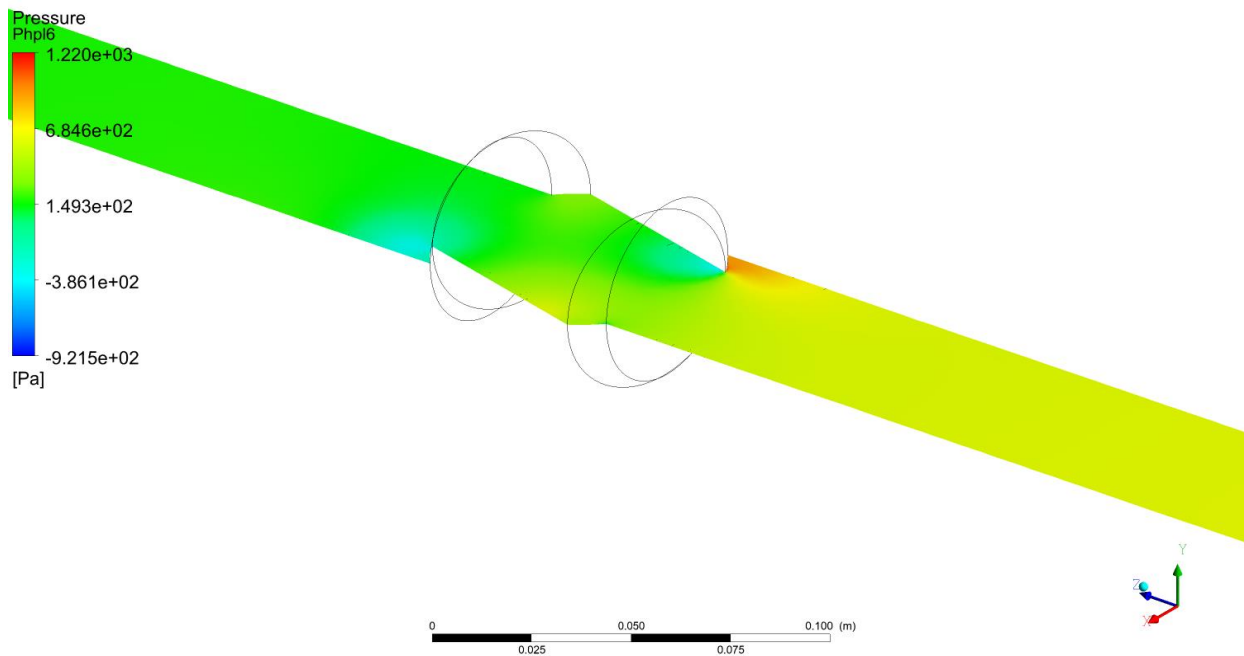
a. Promjena relativnog tlaka  $p$  duž horizontalne ravnine 6



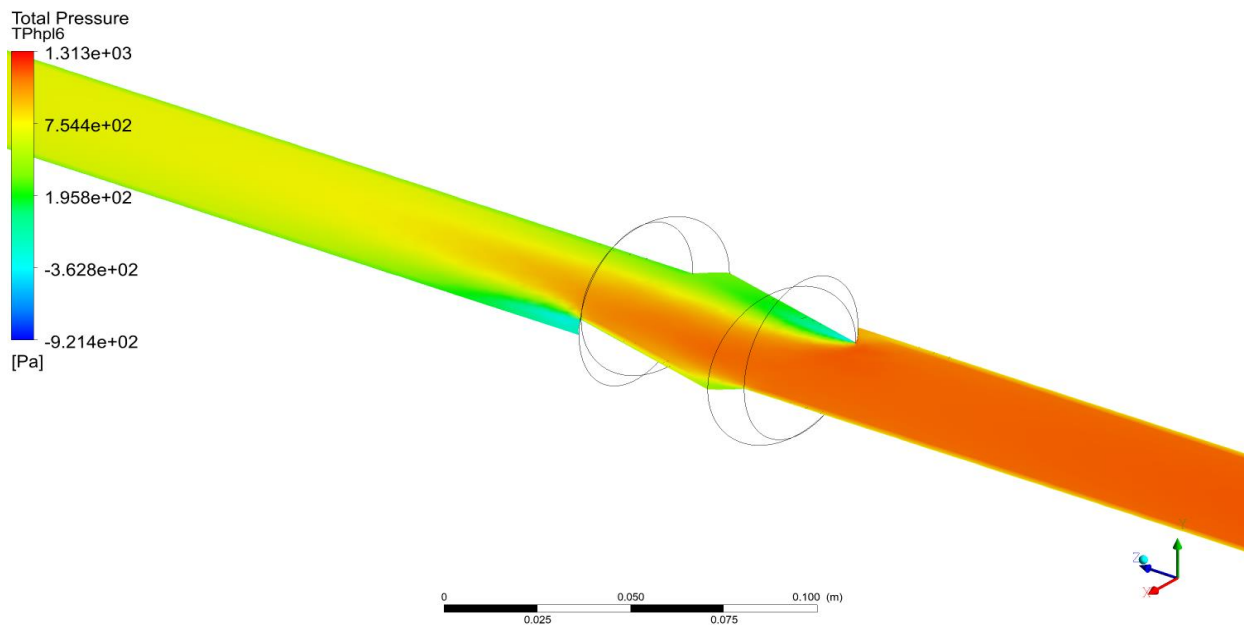
b. Promjena ukupnog tlaka  $p_t$  duž horizontalne ravnine 6

Slika 5.9. a.-b. Promjene relativnog  $p$  i ukupnog tlaka  $p_t$  duž horizontalne ravnine za slučaj rotacije zatvarača za  $60^\circ$  u odnosu na vertikalnu os

- Rotacija zatvarača za  $75^\circ$  u odnosu na vertikalnu os



a. Promjena relativnog tlaka  $p$  duž horizontalne ravnine 6



b. Promjena ukupnog tlaka  $p_t$  duž horizontalne ravnine 6

Slika 5.10. a.-b. Promjene relativnog  $p$  i ukupnog tlaka  $p_t$  duž horizontalne ravnine za slučaj rotacije zatvarača za  $75^\circ$  u odnosu na vertikalnu os



Rotacijom zatvarača za veći stupanj moguće je uočiti manju razliku između ekstrema. Najkritičniji dio je kontakt cijevi i zatvarača, budući da tu dolazi do naglih opadanja vrijednosti relativnog i ukupnog tlaka. Najnepovoljniji slučaj, ukoliko se promatra razlika u vrijednosti ekstrema, je prvi sa rotacijom zatvarača od  $15^\circ$  u odnosu na vertikalnu os (slika 5.6. a-b). Veća vrijednost relativnog i ukupnog tlaka u dijelu sustava do zatvarača izazvati će veću vrijednost podtlaka (negativnog manometarskog tlaka) u dijelu sustava nakon zatvarača. U konačnici je time uzrokovana veća nestabilnost u cijevnom sustavu.

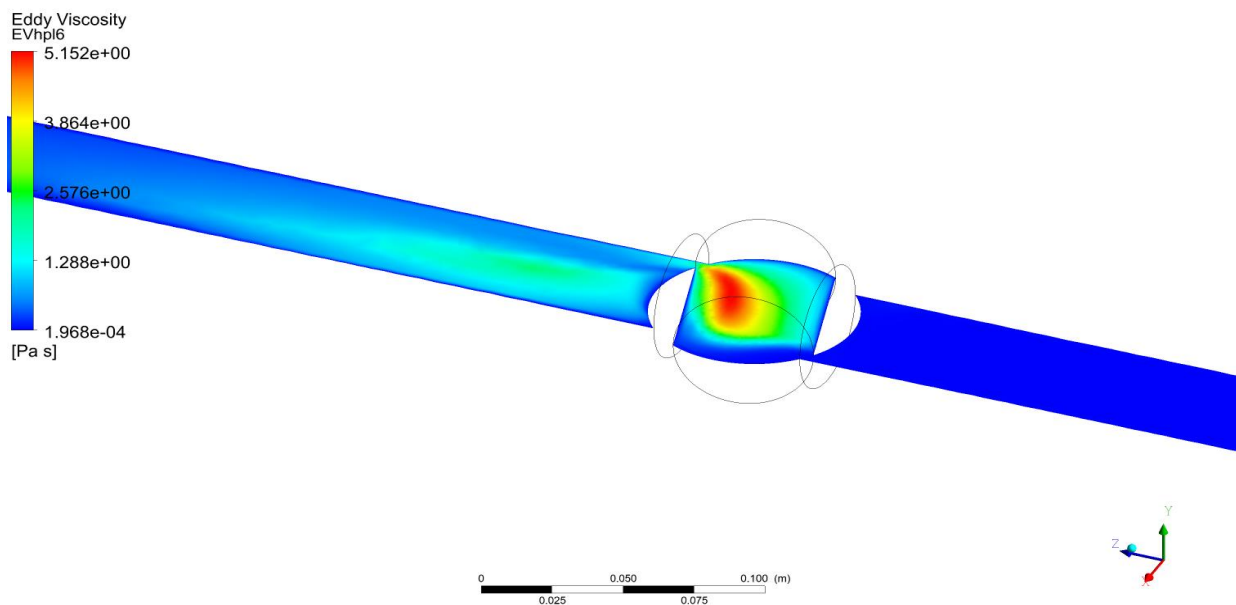
### ***5.1.3. Vrtložna viskoznost (eng. Eddy Viscosity)***

Viskoznost se može objasniti kao otpor fluida protiv tangencijalnih ili kutnih deformacija čestica ili jednostavno, otpor fluida prema tečenju [29]. Vrtložna viskoznost ovisi o intenzitetu miješanja vrtloga čestica. Najmanja je u području neposredno uz stijenku, dok se udaljavanjem povećava i postaje sve dominantnija. Pri uvjetima laminarnog strujanja dominira molekularna viskoznost, no prelaskom u turbulentno strujanje i pojavom vrtloga dolazi do povećanja vrijednosti vrtložne viskoznosti.

U nastavku se razmatra promjena vrtložne viskoznosti u horizontalnom i vertikalnom smjeru, od -15 mm do +15 mm u y smjeru te od -50 mm do + 50 mm u z smjeru. Također, razmatra se što se događa sa promjenom vrtložne viskoznosti u ovisnosti o svih pet slučajeva rotacije zatvarača:  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  i  $75^\circ$ . Cilj je uočiti područje mogućeg razvitka turbulencija čije bi djelovanje moglo naštetiti zatvaraču i cijevnom sustavu. Slikama 5.11. a-e prikazane su promjene vrtložne viskoznosti ovisno o stupnju rotacije zatvarača. Kao referentna ravnina je odabrana horizontalno položena koja prolazi središtem zatvarača.

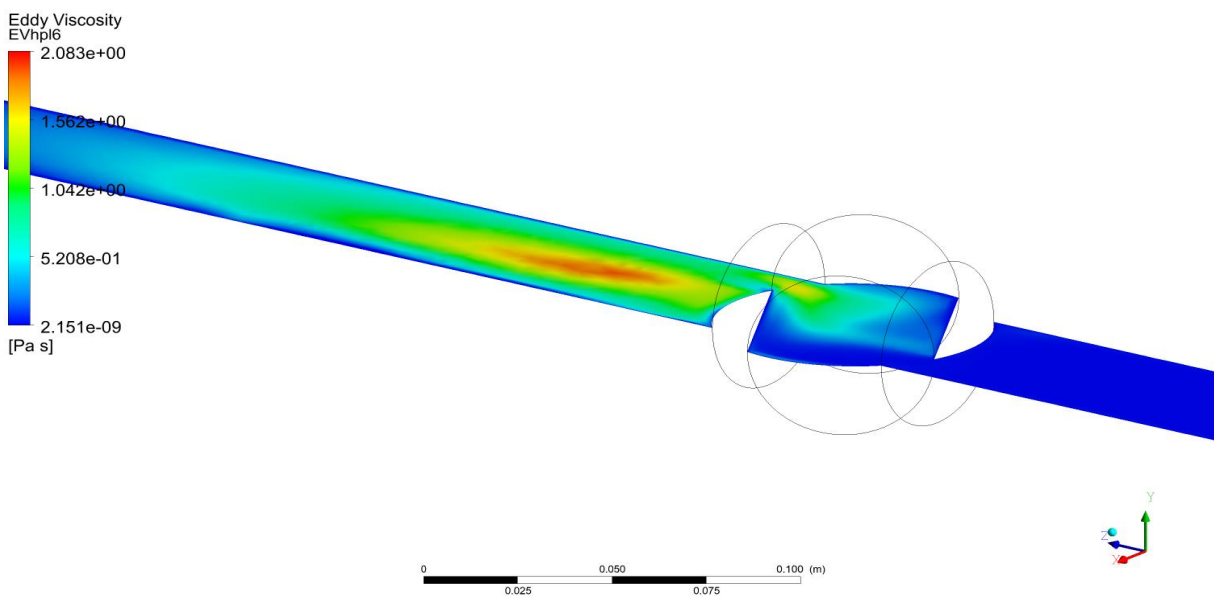
Sudeći po rezultatima dobivenih analizom brzine, relativnog i ukupnog tlaka za pretpostaviti je kako će vrtložna viskoznost poprimiti maksimalne vrijednosti u području gdje su prethodno opisane veličine dosegle svoje minimalne ili negativne vrijednosti.

- Rotacija zatvarača za  $15^\circ$  u odnosu na vertikalnu os



a. Promjena vrtložne viskoznosti  $\nu_t$  duž horizontalne ravnine 6 (kut rotacije  $15^\circ$ )

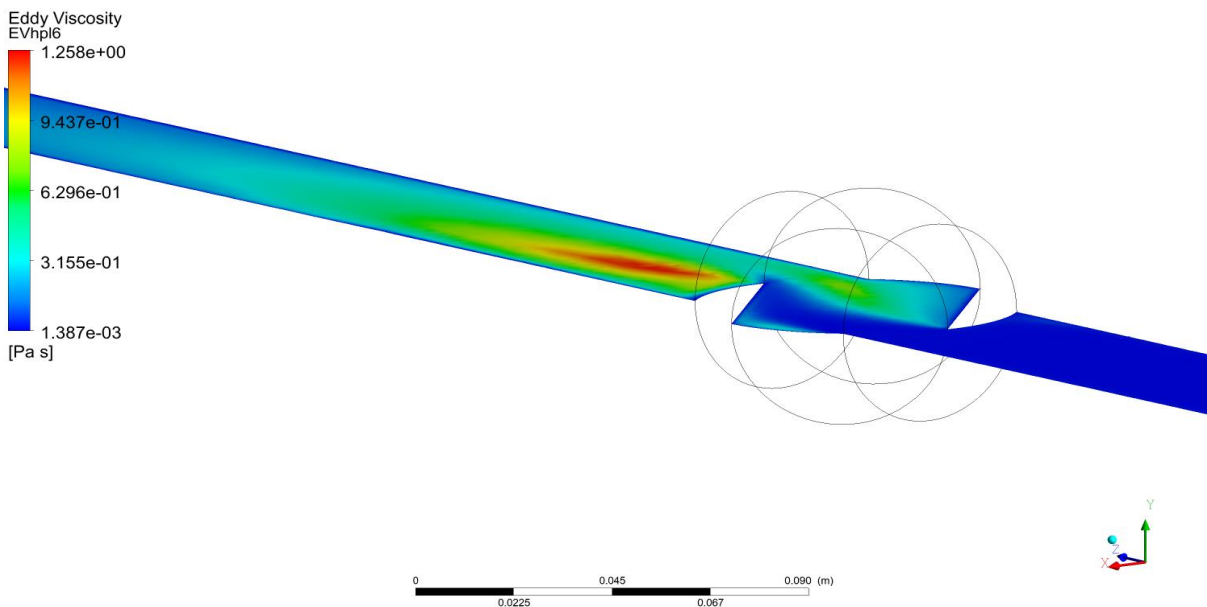
- Rotacija zatvarača za  $30^\circ$  u odnosu na vertikalnu os



b. Promjena vrtložne viskoznosti  $\nu_t$  duž horizontalne ravnine 6 (kut rotacije  $30^\circ$ )

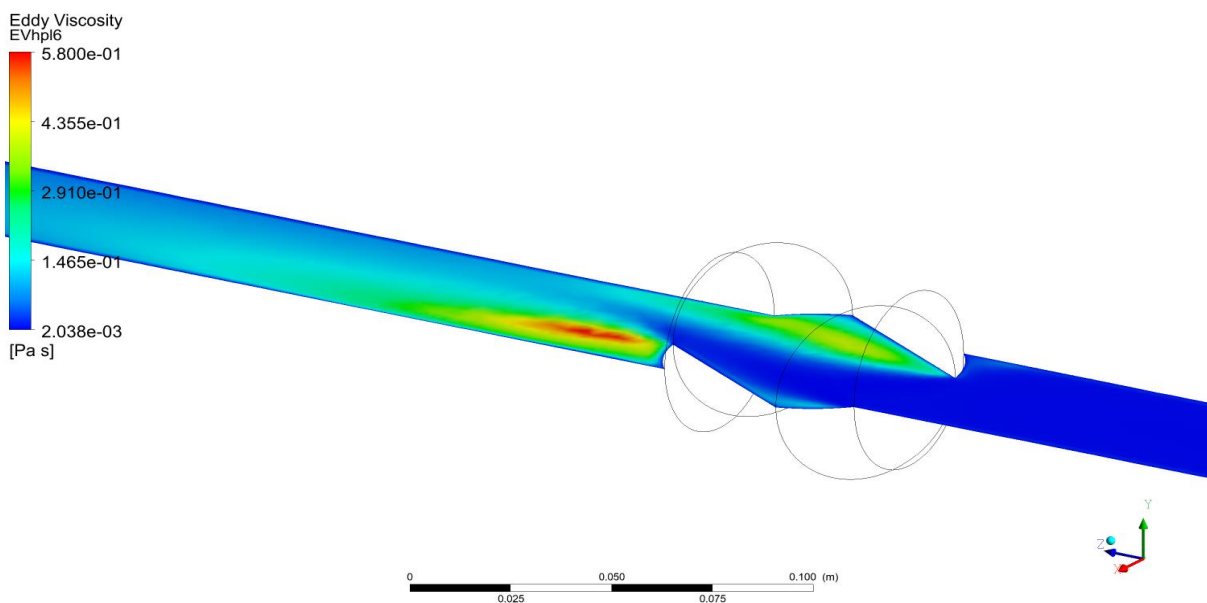
Slika 5.11. a.-e. Promjene vrtložne viskoznosti  $\nu_t$  duž horizontalnih ravnina – Varijanta 1

- Rotacija zatvarača za  $45^\circ$  u odnosu na vertikalnu os



c. Promjena vrtložne viskoznosti  $\nu_t$  duž horizontalne ravnine 6 (kut rotacije  $45^\circ$ )

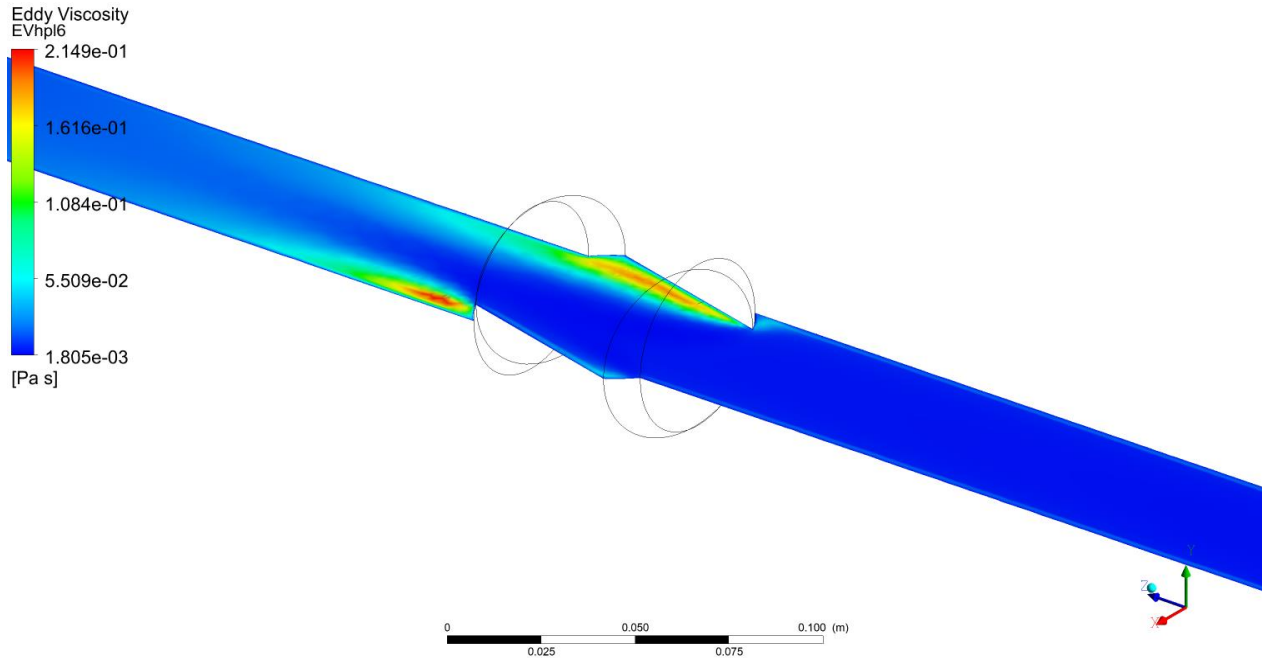
- Rotacija zatvarača za  $60^\circ$  u odnosu na vertikalnu os



d. Promjena vrtložne viskoznosti  $\nu_t$  duž horizontalne ravnine 6 (kut rotacije  $60^\circ$ )

Slika 5.11. a.-e. Promjene vrtložne viskoznosti  $\nu_t$  duž horizontalnih ravnina – Varijanta 1, nastavak

- Rotacija zatvarača za 75° u odnosu na vertikalnu os



- e. Promjena vrtložne viskoznosti  $\nu_t$  duž horizontalne ravnine 6 (kut rotacije 75°)

Slika 5.11. a.-e. Promjene vrtložne viskoznosti  $\nu_t$  duž horizontalnih ravnina – Varijanta 1, nastavak

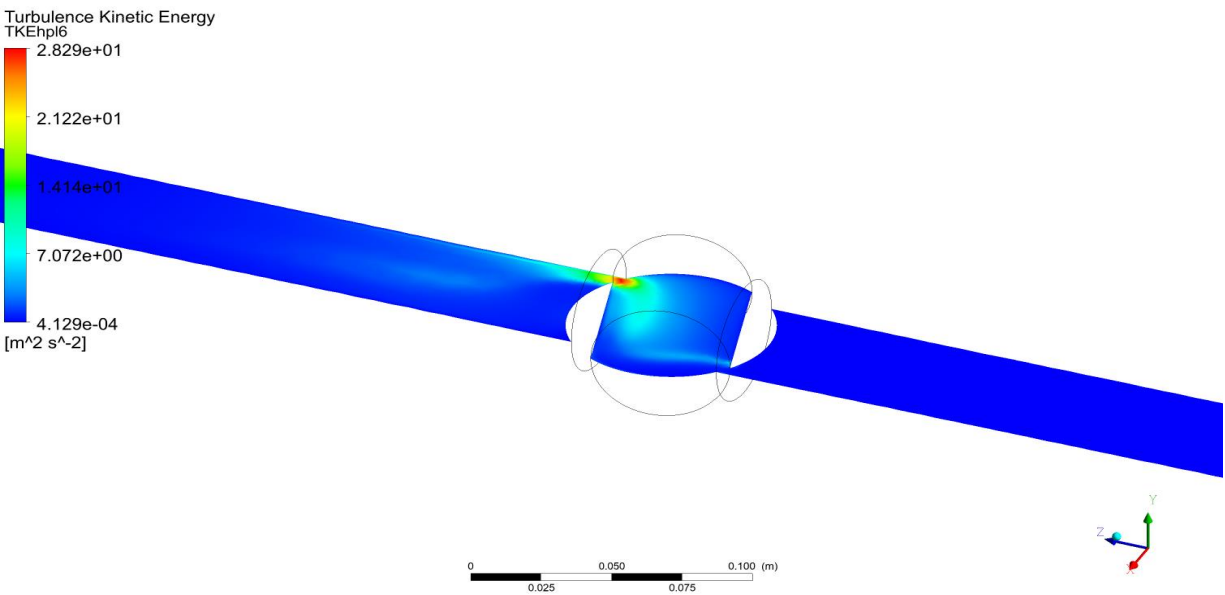
Rotacijom zatvarača za veći stupanj dolazi do smanjenja razlike između ekstremnih vrijednosti. U prvom slučaju rotacije zatvarača za 15° u odnosu na vertikalnu os najveće vrijednosti su zabilježene u području kuglastog zatvarača (slika 5.11.a). Razlog za to je minimalna otvorenost zatvarača uslijed koje voda, koja dolazi sa maksimalnom brzinom toka i pritiskom, ne može brže protjeci tim dijelom sustava te dolazi do pojave maksimalne vrtložnosti. Povećanjem stupnja rotacije strujanje fluida u kuglastom zatvaraču se umiruje i vrtložno strujanje nastaje u području iza zatvarača. Najpogodniji su slučajevi rotacije zatvarača za 60° i 75°.

U prvome dijelu sustava (do zatvarača) zabilježene su najmanje vrijednosti vrtložne viskoznosti. Do toga dolazi iz razloga što do zatvarača voda struji konstantnim poprečnim presjekom sa nepromjenjivim vrijednostima brzine toka i tlaka. Pojavom zatvarača u sustavu dolazi do promjene geometrije, pa time i promjene vrijednosti vrtložne viskoznosti.

### 5.1.4. Kinetička energija turbulencije (eng. Turbulence Kinetic Energy)

U nastavku se razmatra promjena kinetičke energije turbulencije u horizontalnom i vertikalnom smjeru, od -15 mm do +15 mm u y smjeru te od -50 mm do +50 mm u z smjeru. Također, razmatra se što se događa u ovisnosti o pet slučajeva rotacije zatvarača: 15°, 30°, 45°, 60° i 75°. Razmatra se postojanje ovisnosti između kinetičke energije turbulencije i vrtložne viskoznosti, tj. da li na mjestu pojave najvećih vrijednosti kinetičke energije dolazi i do pojave maksimalnih vrijednosti vrtložne viskoznosti. Slikama 5.12.a-e prikazane su promjene u vrijednosti kinetičke energije ovisno o stupnju rotacije zatvarača u odnosu na vertikalnu os.

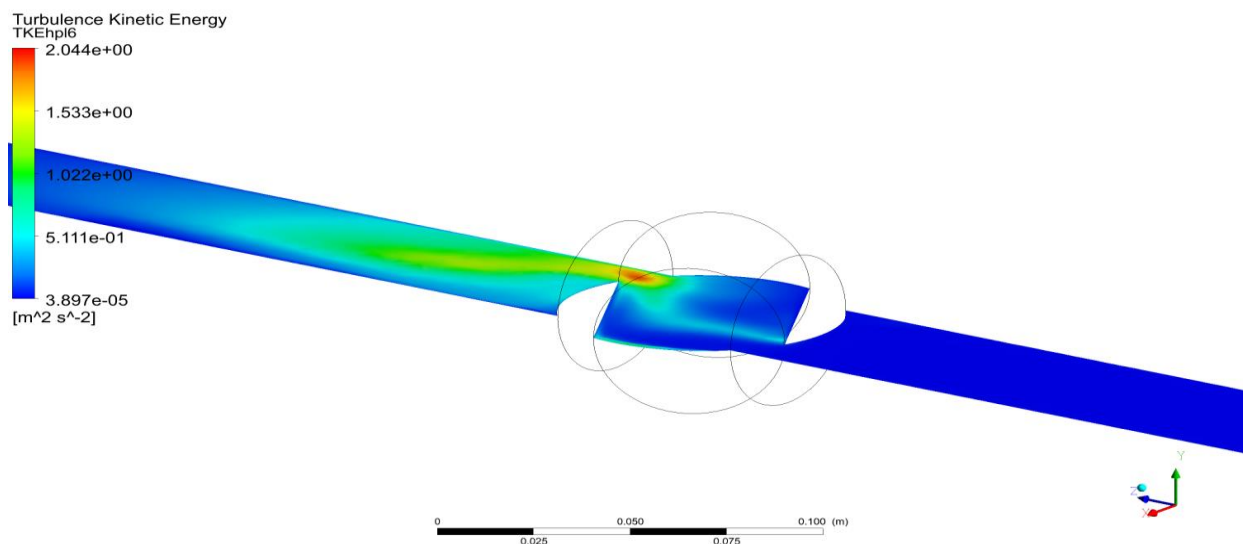
- Rotacija zatvarača za 15° u odnosu na vertikalnu os



- a. Promjena kinetičke energije turbulencije  $k$  duž horizontalne ravnine 6 (kut rotacije 15°)

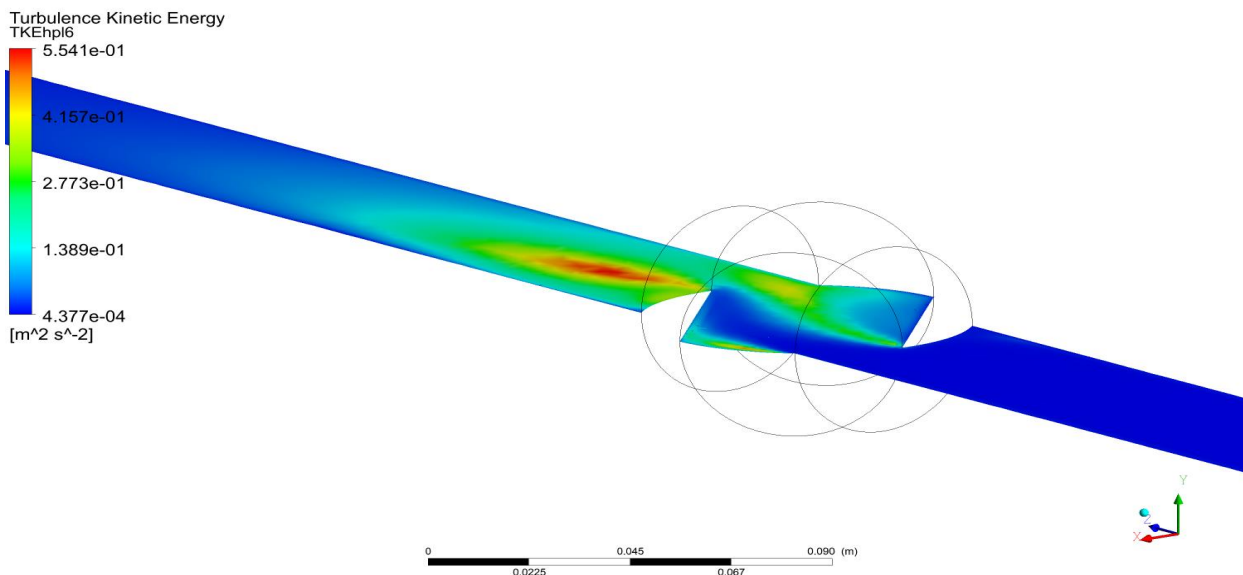
Slika 5.12. a.-e. Promjene kinetičke energije turbulencije  $k$  duž horizontalnih ravnina u odnosu na kut rotacije oko vertikalne osi -Varijanta 1

- Rotacija zatvarača za  $30^\circ$  u odnosu na vertikalnu os



b. Promjena kinetičke energije turbulencije  $k$  duž horizontalne ravnine 6 (kut rotacije  $30^\circ$ )

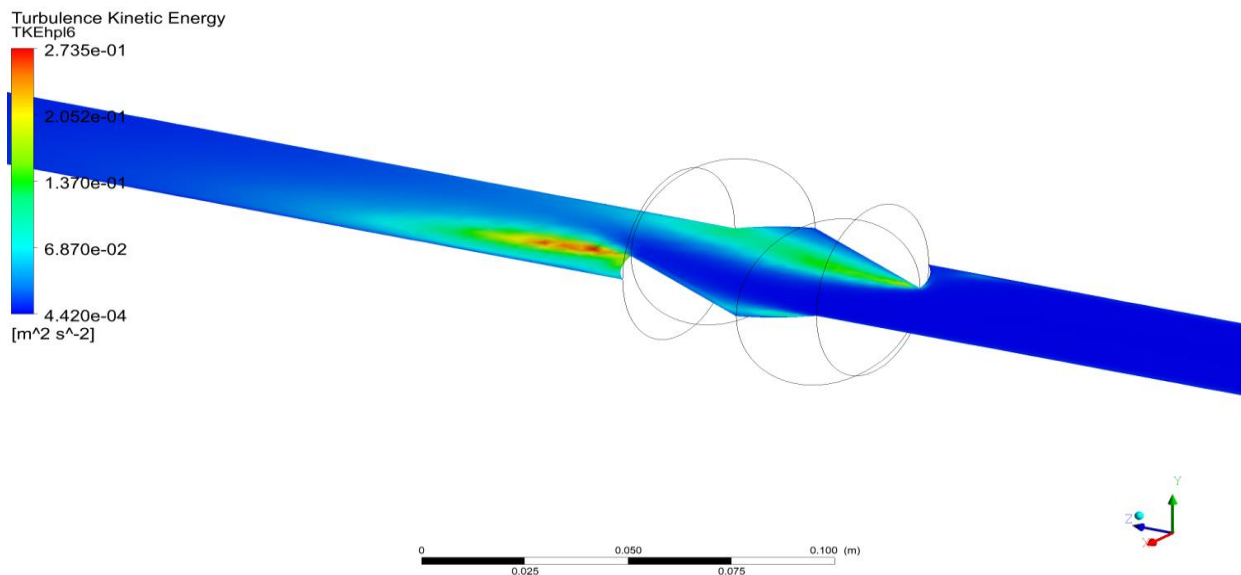
- Rotacija zatvarača za  $45^\circ$  u odnosu na vertikalnu os



c. Promjena kinetičke energije turbulencije  $k$  duž horizontalne ravnine 6 (kut rotacije  $45^\circ$ )

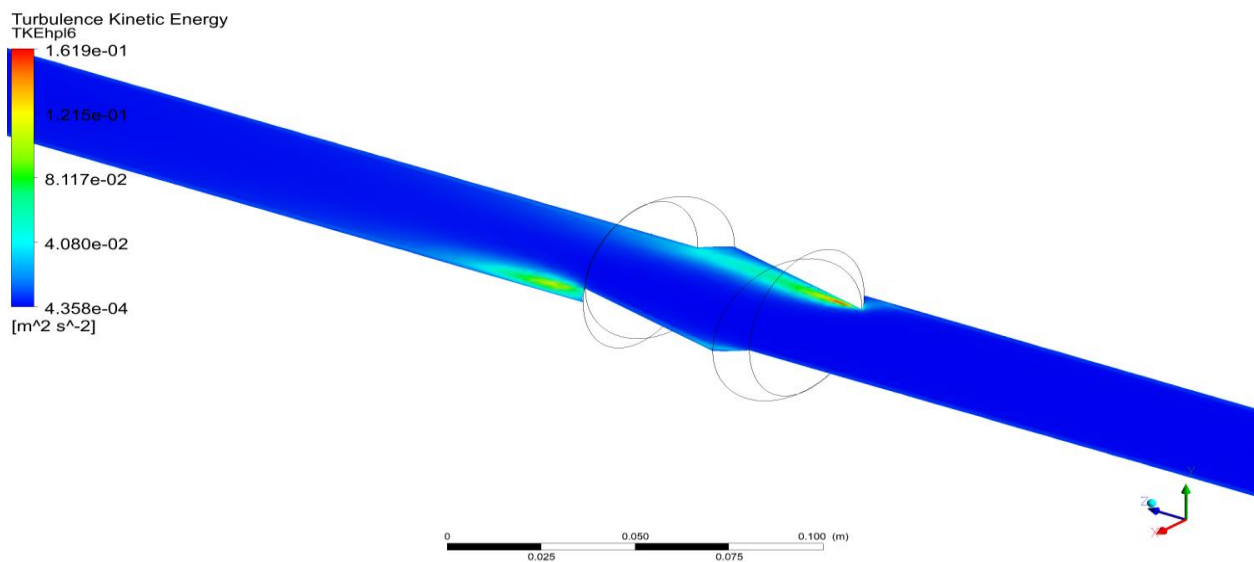
Slika 5.12. a.-e. Promjene kinetičke energije turbulencije  $k$  duž horizontalnih ravnina u odnosu na kut rotacije oko vertikalne osi – Varijanta 1, nastavak

- Rotacija zatvarača za  $60^\circ$  u odnosu na vertikalnu os



d. Promjena kinetičke energije turbulencije  $k$  duž horizontalne ravnine 6 (kut rotacije  $60^\circ$ )

- Rotacija zatvarača za  $75^\circ$  u odnosu na vertikalnu os



e. Promjena kinetičke energije turbulencije  $k$  duž horizontalne ravnine 6 (kut rotacije  $75^\circ$ )

Slika 5.12. a.-e. Promjene kinetičke energije turbulencije  $k$  duž horizontalnih ravnina u odnosu na kut rotacije oko vertikalne osi – Varijanta 1, nastavak

Rotacijom zatvarača za veći stupanj dolazi do smanjenja razlike između ekstrema. U dijelu sustava od ulaza do zatvarača nema promjene, te su tamo zabilježene minimalne vrijednosti kinetičke energije, budući da je poprečni presjek konstantan (cijev) i nema fizičkih prepreka strujanju vode. Za prvi slučaj rotacije zatvarača za  $15^\circ$  u odnosu na vertikalnu os najveće vrijednosti su zabilježene na kontaktu zatvarač-cijev. Daljnjom rotacijom zatvarača maksimalne vrijednosti se pojavljuju upravo na onome dijelu gdje su zabilježene maksimalne vrijednosti vrtložne viskoznosti. Najpogodniji slučajevi su oni sa većim kutem rotacije zatvarača. U takvom položaju je površina poprečnog presjeka veća u odnosu na prvi slučaj, pa su manji pritisci i turbulencije koji nastaju, a time i kinetička energija.

## **5.2. Druga varijanta hidrauličkog proračuna**

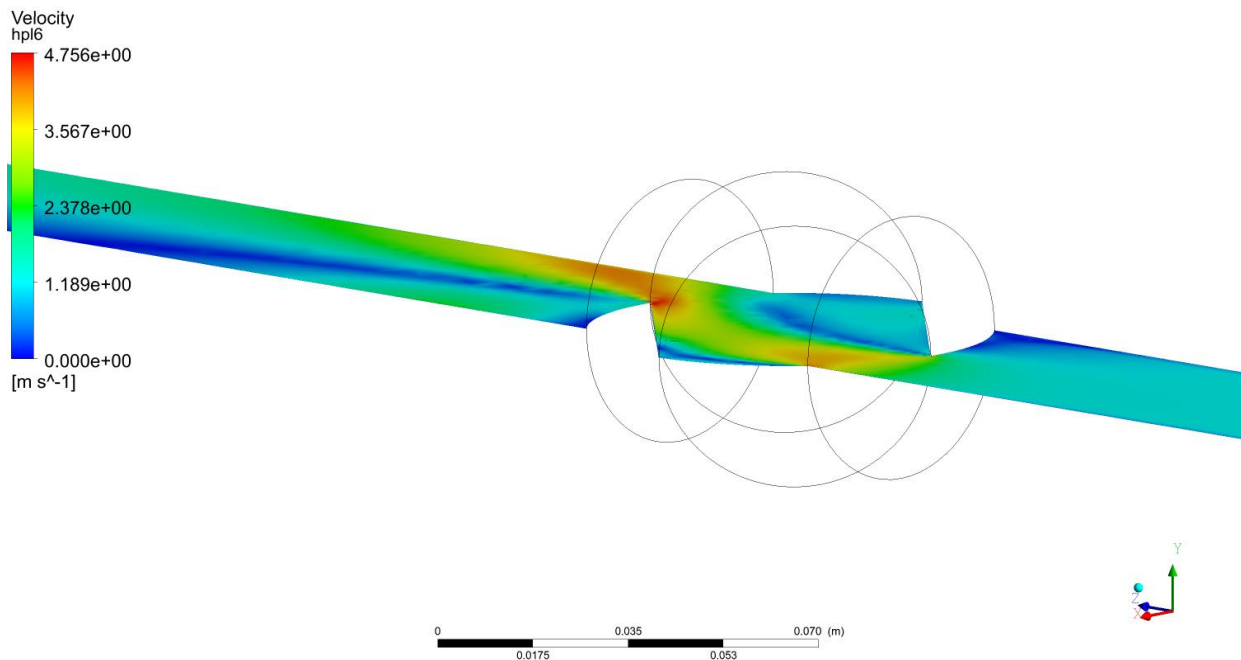
Druga varijanta hidrauličkog proračuna podrazumijeva konstantnu geometriju u kojoj je promjer cijevi  $D=50$  mm i stupanj rotacije zatvarača od  $45^\circ$  u odnosu na vertikalnu os. Brzina toka je sa početnih 1,0 m/s mijenjana do vrijednosti 2,0 m/s, sa stopom prirasta od 0,2 m/s. Prikazani su rezultati u slučajevima kada su vrijednosti brzine toka na ulazu jednake 1,2, 1,6 i 2,0 m/s kako bi se uočilo što se prilikom promjene ulazne brzine toka događa sa vrijednostima preostalih fizikalnih veličina poput brzine u sustavu, ukupnim i relativnim tlakovima, vrtložnom viskoznosti, te kako se mijenja kinetička energija turbulencije.

### ***5.2.1. Brzina toka u smjeru centralne horizontalne osi***

Povećanjem ulazne brzine toka za 0,2 m/s želi se utvrditi proporcionalnost u porastu vrijednosti brzina toka općenito u sustavu. Pretpostavlja se da će najveće brzine toka biti zabilježene na mjestu strujanja fluida iz zatvarača u cijev. Slikama 5.13.a-c prikazana je promjena brzine toka  $v$  duž horizontalne ravnine postavljene u središte zatvarača.

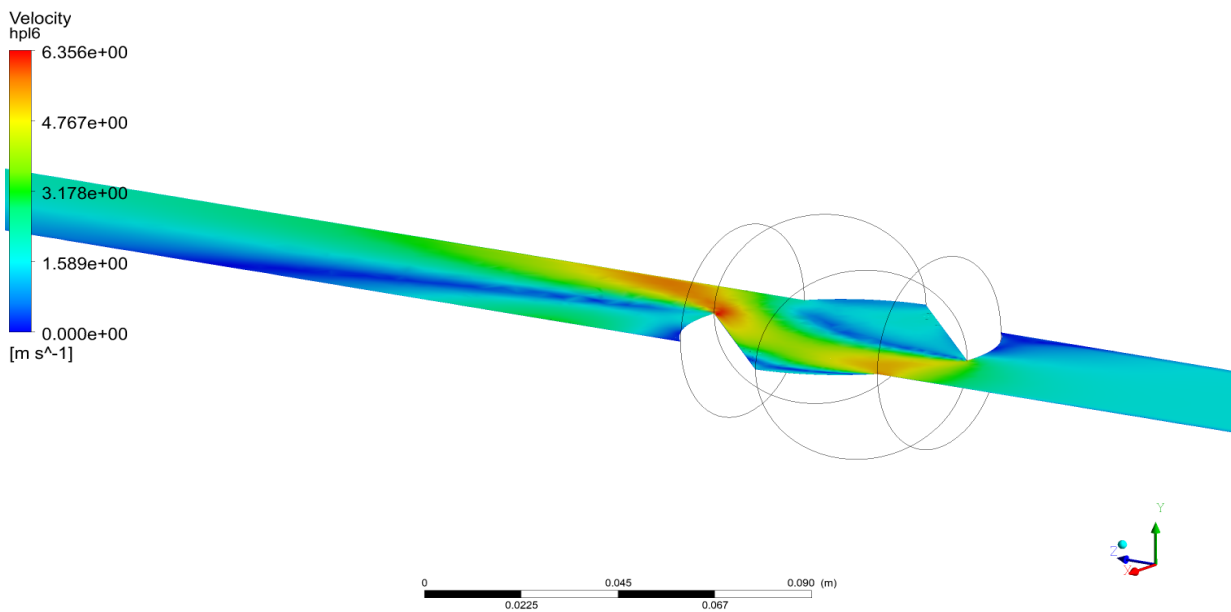


- $v_{ul}=1,2$  m/s (ulazna brzina toka)



a. Promjena brzine toka  $v$  duž horizontalne ravnine 6 ( $v_{ul}=1,2$  m/s)

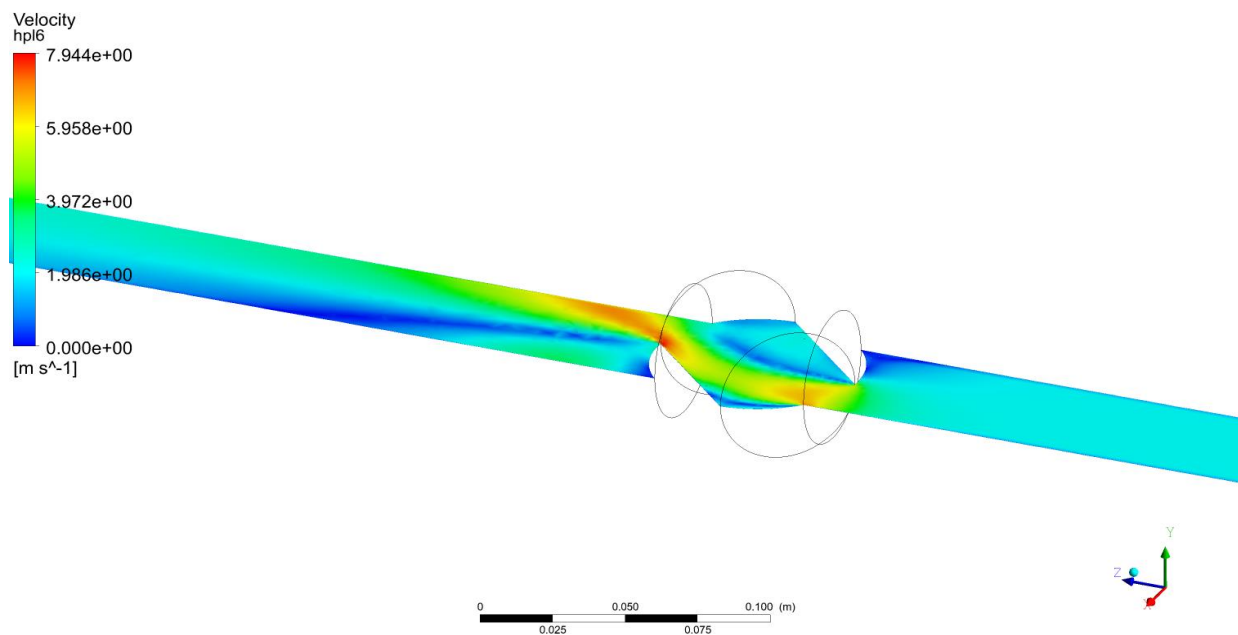
- $v_{ul}=1,6$  m/s (ulazna brzina toka)



b. Promjena brzine toka  $v$  duž horizontalne ravnine 6 ( $v_{ul}=1,6$  m/s)

Slika 5.13. a.-c. Promjene brzine  $v$  uzduž toka duž horizontalnih ravnina

- $v_{ul}=2,0$  m/s (ulazna brzina toka)



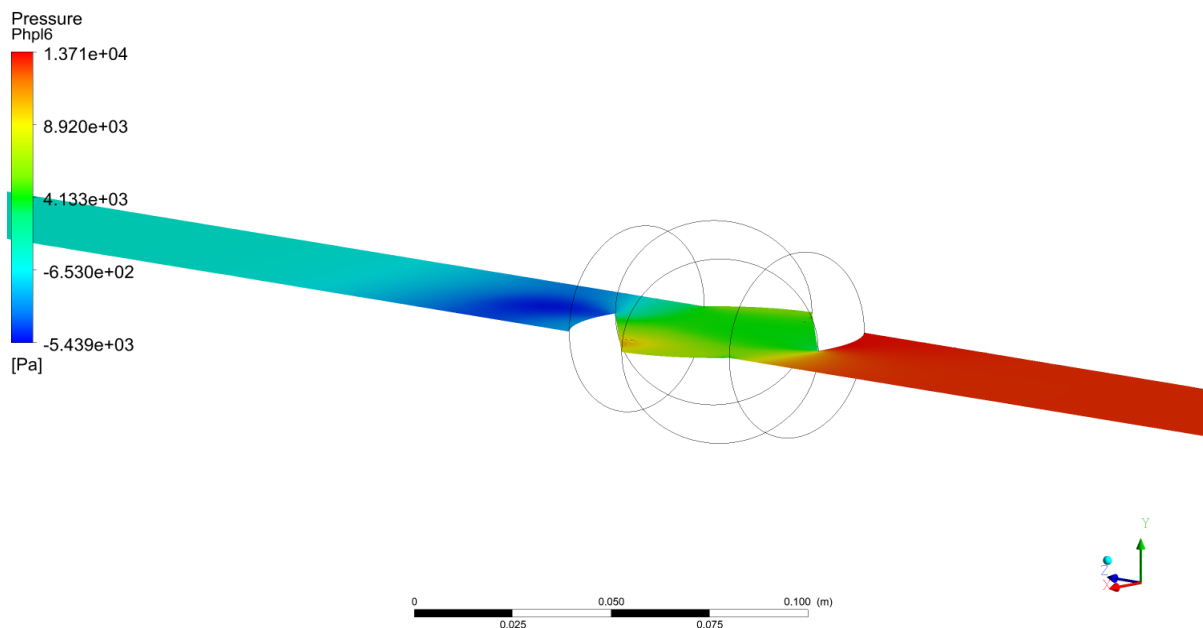
c. Promjena brzine toka  $v$  duž horizontalne ravnine 6 ( $v_{ul}=2,0$  m/s)

Slika 5.13. a.-c. Promjene brzine  $v$  uzduž toka duž horizontalnih ravnina, nastavak

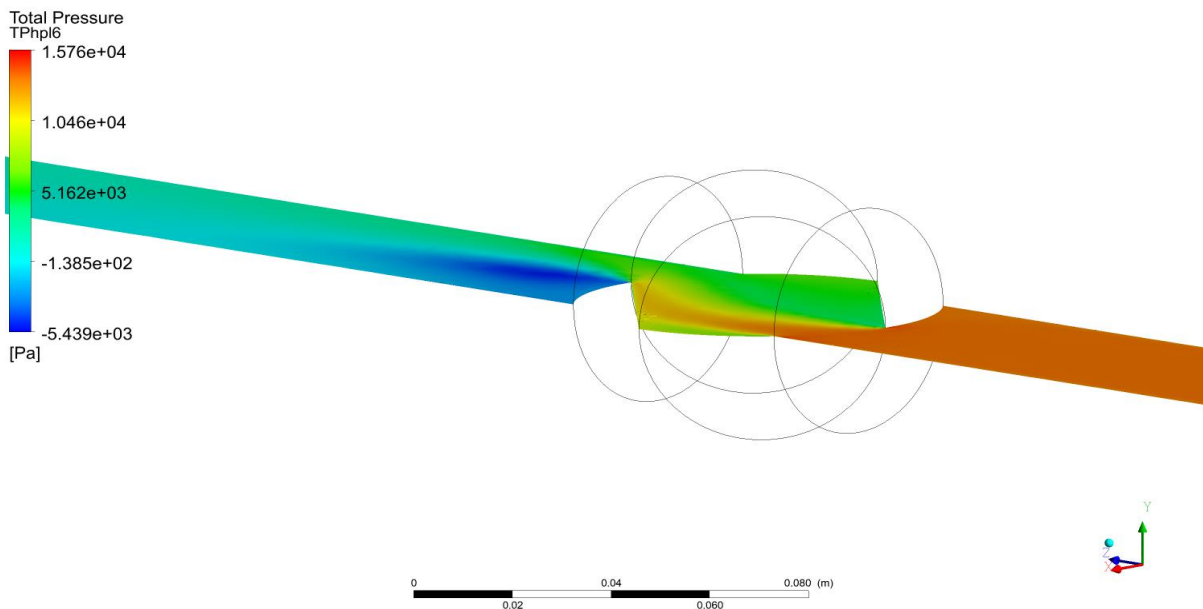
### 5.2.2. Relativni i ukupni tlak

Promatra se promjena relativnog  $p$  i ukupnog tlaka  $p_t$  u ovisnosti o promjeni ulazne brzine toka sa stopom prirasta od 0,2 m/s. Pretpostavlja se da će sa većom ulaznom brzinom toka i tlak fluida na zatvarač biti veći. Slikama 5.14.a-b – 5.16.a-b prikazane su promjene relativnog  $p$  i ukupnog tlaka  $p_t$  duž horizontalne ravnine koja prolazi središtem zatvarača.

- $v_{ul}=1,2$  m/s (ulazna brzina toka)



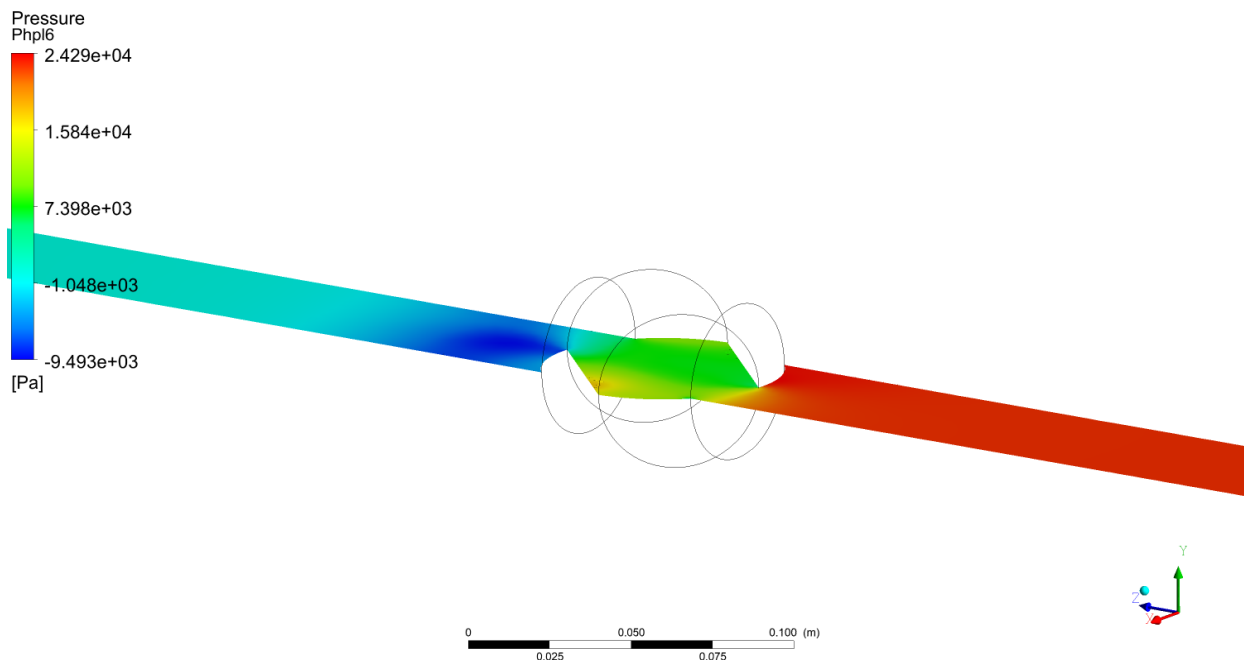
a. Promjena relativnog tlaka  $p$  duž horizontalne ravnine 6 ( $v_{ul}=1,2$  m/s)



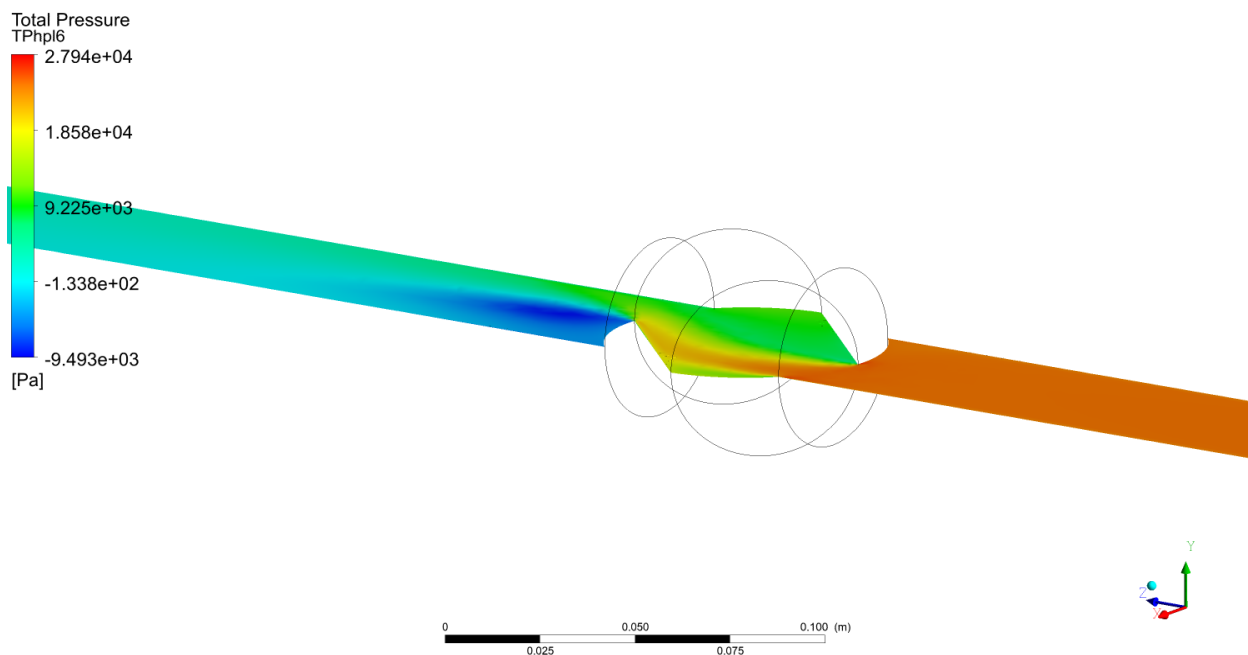
b. Promjena ukupnog tlaka  $p_t$  duž horizontalne ravnine 6 ( $v_{ul}=1,2$  m/s)

Slika 5.14. a.-b. Promjene relativnog  $p$  i ukupnog tlaka  $p_t$  duž horizontalnih ravnina

- $v_{ul}=1,6$  m/s (ulazna brzina toka)



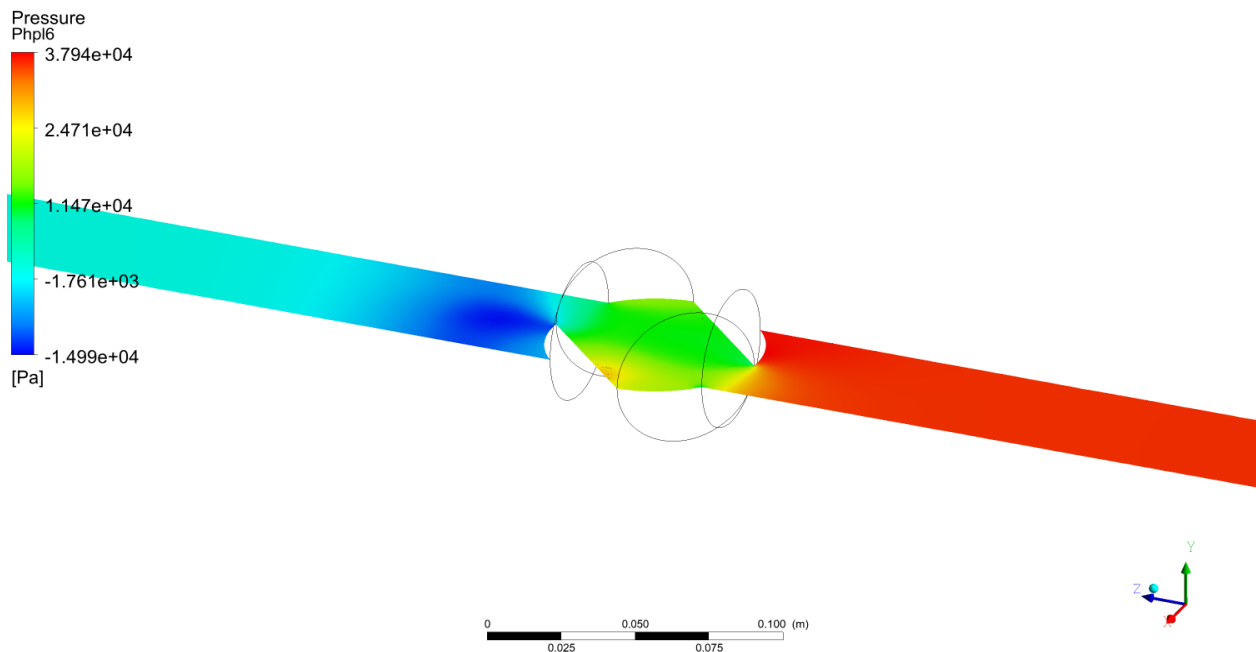
a. Promjena relativnog tlaka  $p$  duž horizontalne ravnine 6 ( $v_{ul}=1,6$  m/s)



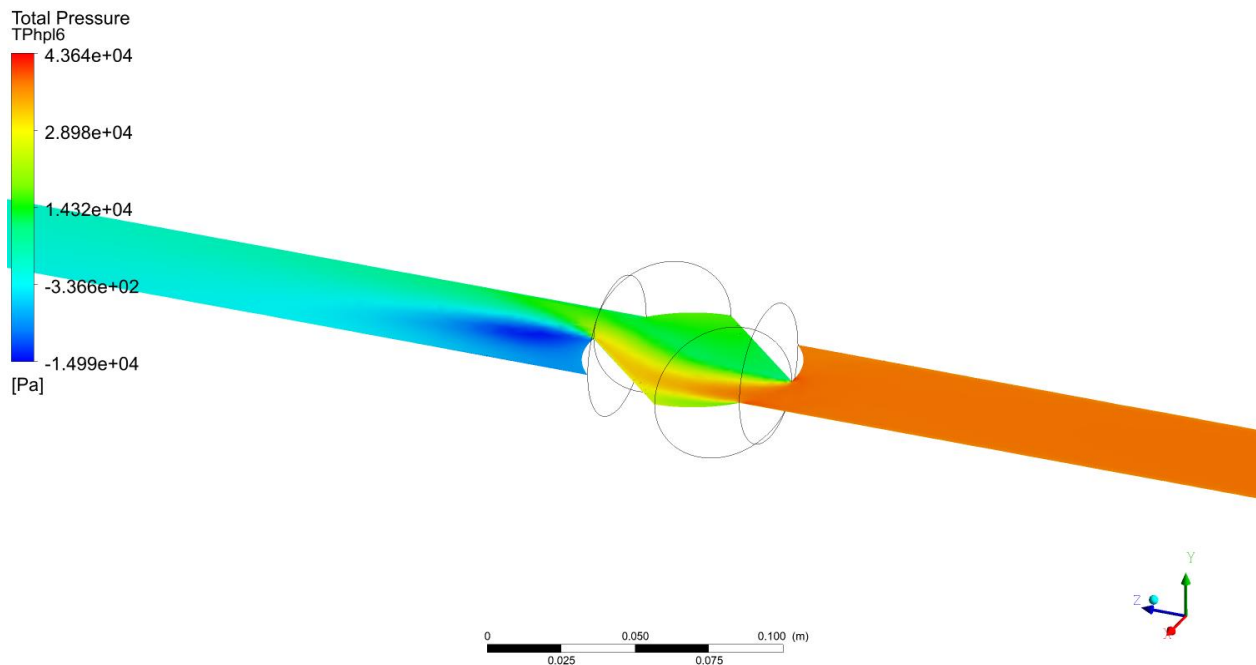
b. Promjena ukupnog tlaka  $p_t$  duž horizontalne ravnine 6 ( $v_{ul}=1,6$  m/s)

Slika 5.15. a.-b. Promjene relativnog  $p$  i ukupnog tlaka  $p_t$  duž horizontalnih ravnina

- $v_{ul}=2,0$  m/s (ulazna brzina toka)



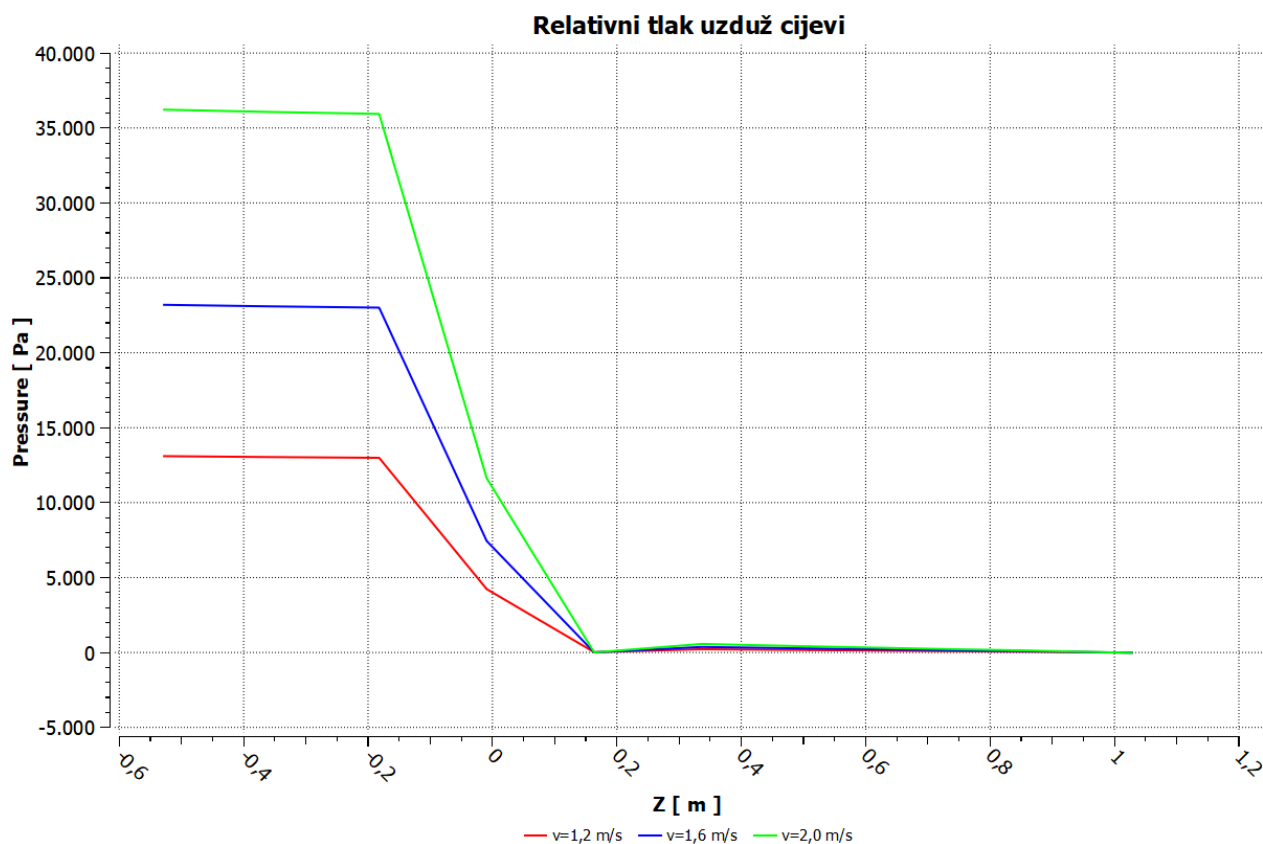
a. Promjena relativnog tlaka  $p$  duž horizontalne ravnine 6 ( $v_{ul}=2,0$  m/s)



b. Promjena ukupnog tlaka  $p_t$  duž horizontalne ravnine 6 ( $v_{ul}=2,0$  m/s)

Slika 5.16. a.-b. Promjene relativnog  $p$  i ukupnog tlaka  $p_t$  duž horizontalnih ravnina

Slikom 5.17. dan je grafički prikaz promjene relativnog tlaka  $p$  za tri različite vrijednosti ulazne brzine toka.



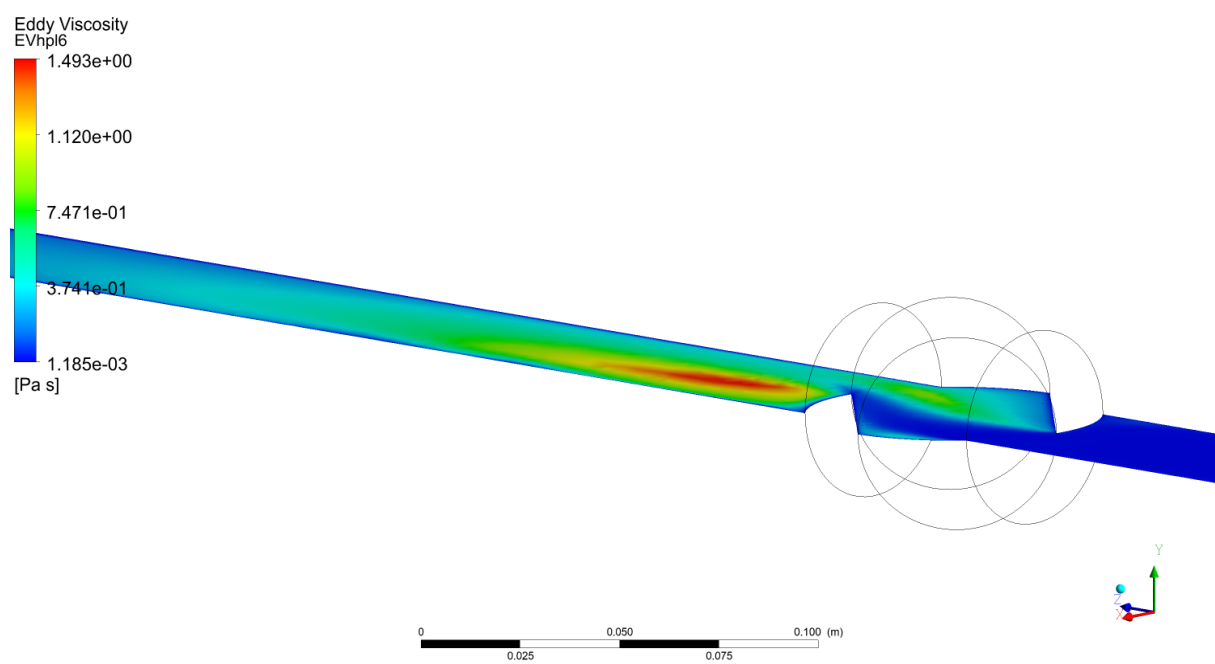
Slika 5.17. Promjena relativnog tlaka  $p$  u sustavu za tri različite brzine toka

Radi lakšeg razumijevanja potrebno je naglasiti kako se središte zatvarača nalazi u točki sa koordinatama  $(0,0,0)$ , a  $z$  os predstavlja ravninu duž koje je cijev položena. Slikama i grafičkim prikazom moguće je uočiti razliku u stabilnosti između prvog i drugog dijela sustava. U prvom dijelu izražene su velike vrijednosti relativnog tlaka koje u području kuglastog zatvarača naglo opadaju, da bi u drugom dijelu došlo do velikog smanjenja vrijednosti i održanja konstantnog tlaka od 0 Pa, što je ujedno i vrijednost atmosferskog tlaka definiranog na izlazu iz sustava.

### 5.2.3. Vrtložna viskoznost (eng. Eddy Viscosity)

U nastavku su prikazane promjene vrtložne viskoznosti u ovisnosti o promjeni vrijednosti ulazne brzine, s pretpostavkom pojave maksimalnih vrijednosti nakon kuglastog zatvarača, odnosno u dijelu gdje dolazi do strujanja fluida u suprotnom smjeru. Slikama 5.18.a-c prikazane su promjene vrtložne viskoznosti duž horizontalne ravnine koja prolazi središtem zatvarača.

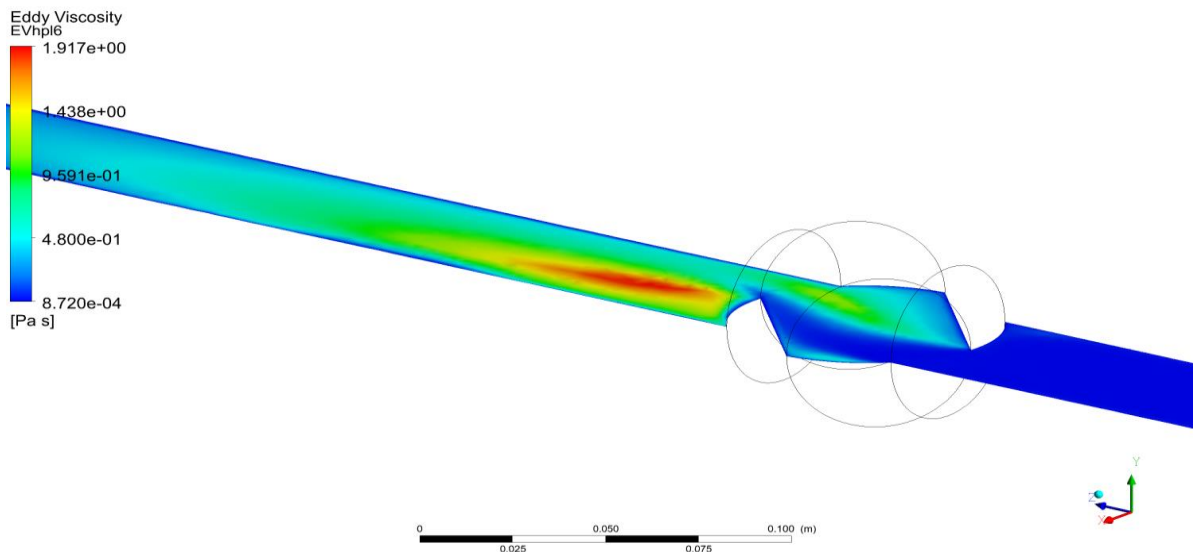
- $v_{ul}=1,2$  m/s (ulazna brzina toka)



- a. Promjena vrtložne viskoznosti  $v_t$  duž horizontalne ravnine 6 ( $v_{ul}=1,2$  m/s)

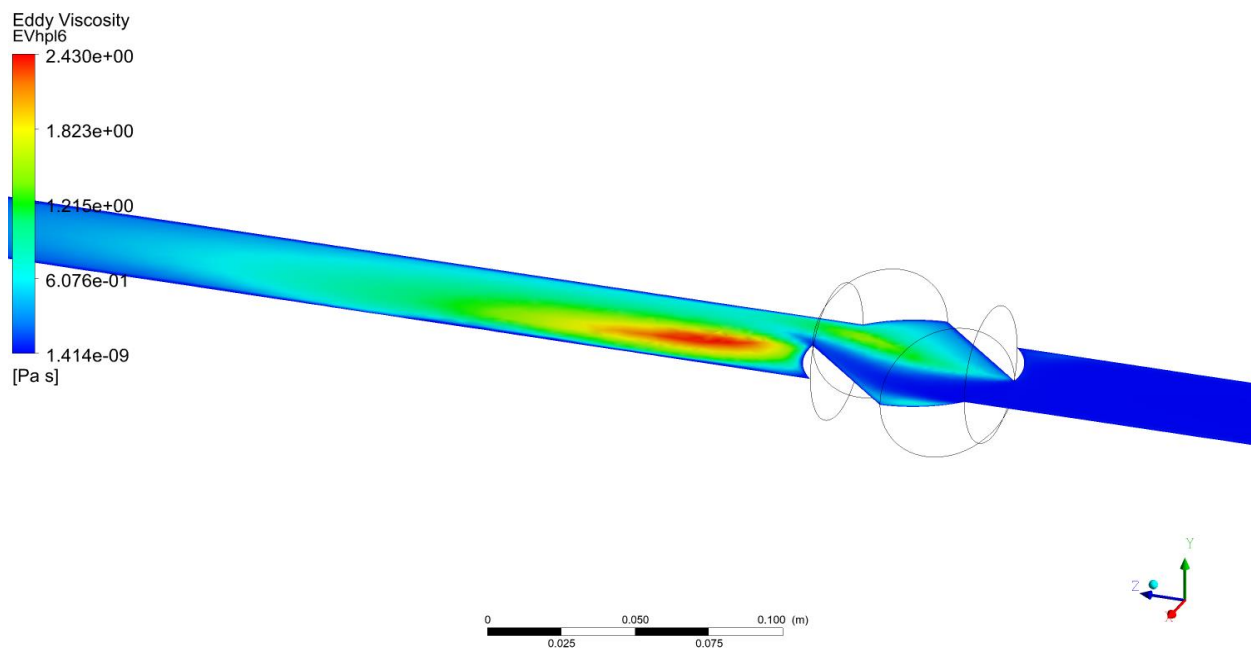
Slika 5.18. a.-c. Promjene vrtložne viskoznosti  $v_t$  duž horizontalnih ravnina pri različitim brzinama toka

- $v_{ul}=1,6$  m/s (ulazna brzina toka)



b. Promjena vrtložne viskoznosti  $v_t$  duž horizontalne ravnine 6 ( $v_{ul}=1,6$  m/s)

- $v_{ul}=2,0$  m/s (ulazna brzina toka)

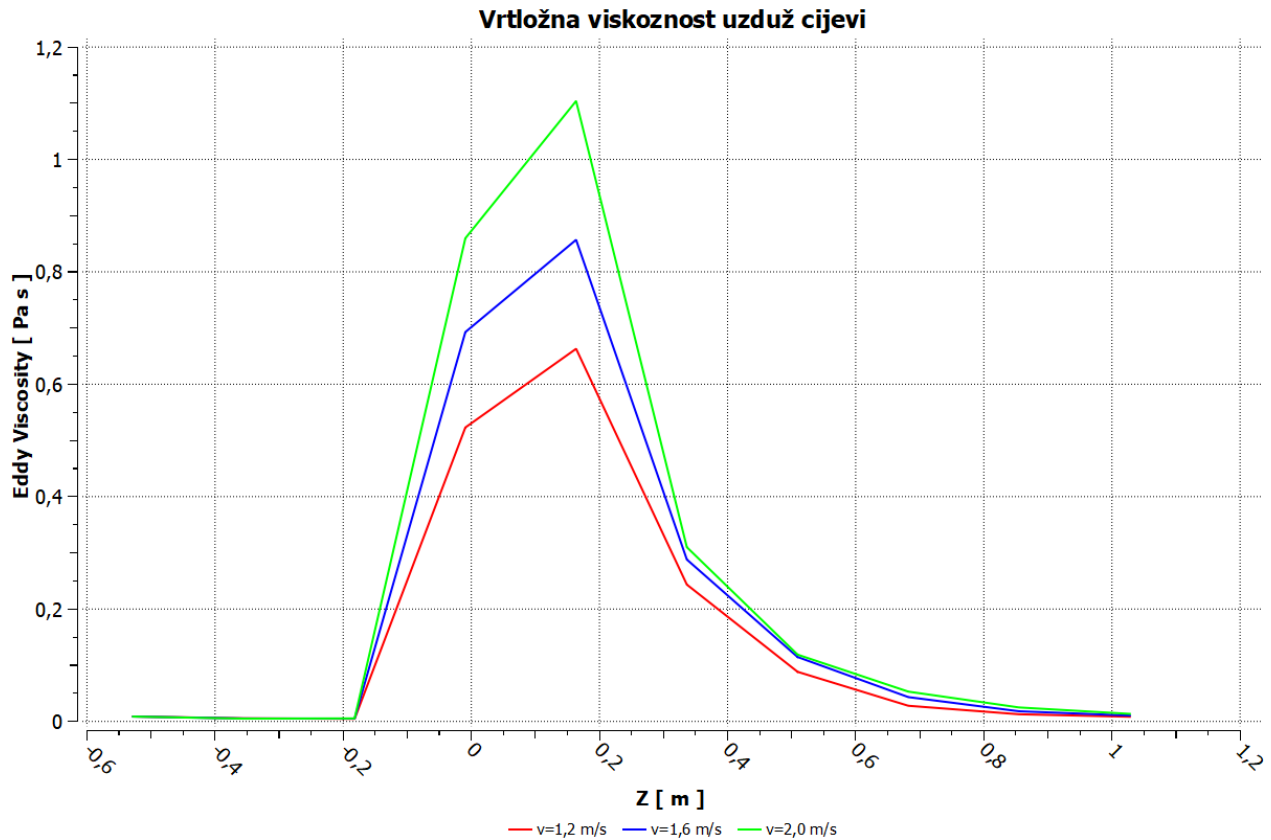


c. Promjena vrtložne viskoznosti  $v_t$  duž horizontalne ravnine 6 ( $v_{ul}=2,0$  m/s)

Slika 5.18. a.-c. Promjene vrtložne viskoznosti  $v_t$  duž horizontalnih ravnina pri različitim brzinama toka, nastavak



Povećanjem brzine dolazi do povećanja vrijednosti vrtložne viskoznosti. Najveća koncentracija je upravo na mjestu relativno najmanjih brzina toka, odnosno strujanja vode u suprotnom smjeru. Ono nastaje kao posljedica turbulentnog strujanja fluida. Povećanjem Reynoldsovog broja ( $Re$ ) dolazi do neuređenog strujanja pri kojemu strujnice fluida nisu paralelne i dolazi do miješanja dijelića tekućine. To uzrokuje pojavu različitih vrijednosti brzine toka na određenom poprečnom profilu. Dio poprečnog presjeka sa minimalnim vrijednostima će kao rezultat geometrije i karaktera strujanja uzrokovati promjenu smjera brzine toka, te konačno stvaranje vrtloga. Promjenu vrtložne viskoznosti za sva tri slučaja promjene ulazne brzine toka moguće je promotriti i na slici 5.19.



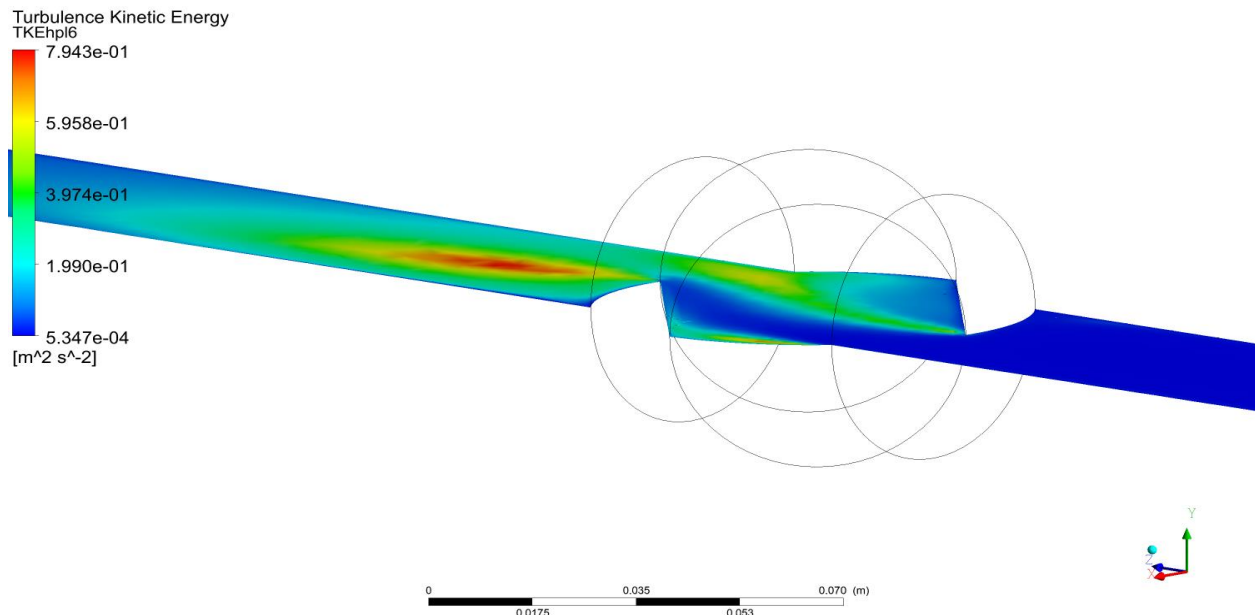
Slika 5.19. Promjena vrtložne viskoznosti  $\nu_t$  u sustavu za tri različite brzine toka

Sa grafičkog prikaza je vidljivo kako do maksimalnih vrijednosti dolazi na području zatvarača, točnije pri izlasku iz njega, nastavljajući svoje opadanje u mnogo blažem karakteru od porasta (u području iza zatvarača), postepeno se približavajući nuli.

### 5.2.4. Kinetička energija turbulencije (eng. *Turbulence Kinetic Energy*)

U nastavku su prikazane promjene kinetičke energije turbulencije u ovisnosti o promjeni vrijednosti ulazne brzine toka, s pretpostavkom pojave maksimalnih vrijednosti nakon kuglastog zatvarača, odnosno u dijelu gdje dolazi do strujanja fluida u suprotnom smjeru. Kao i u Varijanti 1 (sa konstantnom vrijednosti ulazne brzine toka  $v_{ul}=1$  m/s) u cilju je uočiti povezanost između vrtložne viskoznosti i kinetičke energije turbulencije. Na slikama 5.20.a-c prikazane su promjene kinetičke energije turbulencije duž horizontalne ravnine koja prolazi središtem zatvarača.

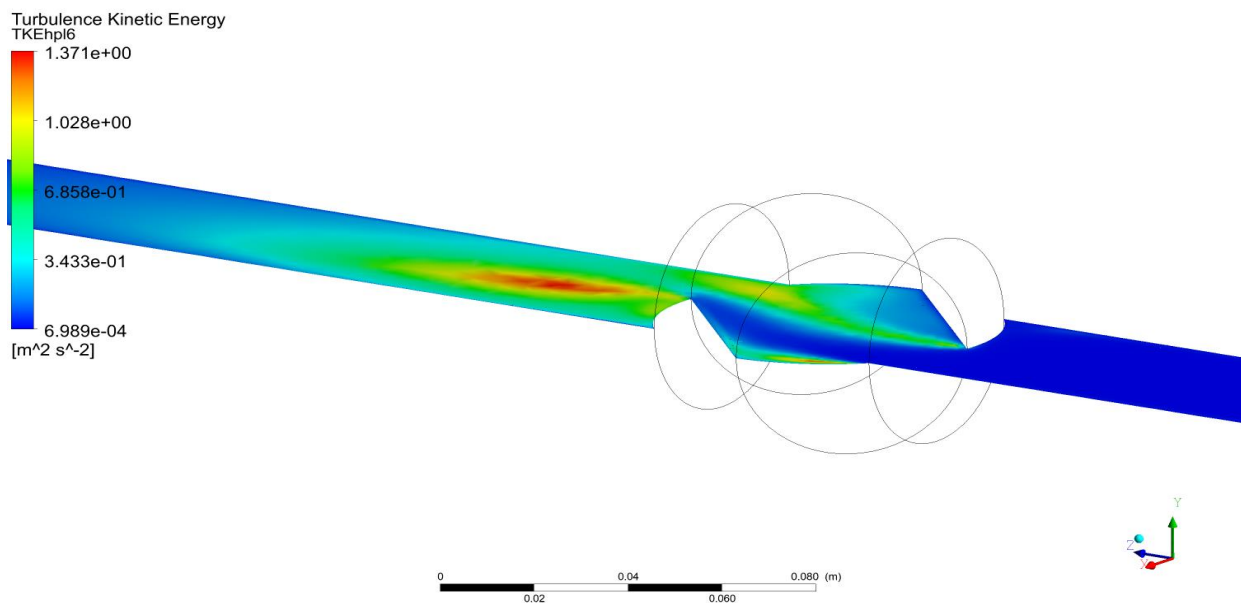
- $v_{ul}=1,2$  m/s (ulazna brzina toka)



- a. Promjena kinetičke energije turbulencije  $k$  duž horizontalne ravnine 6 ( $v_{ul}=1,2$  m/s)

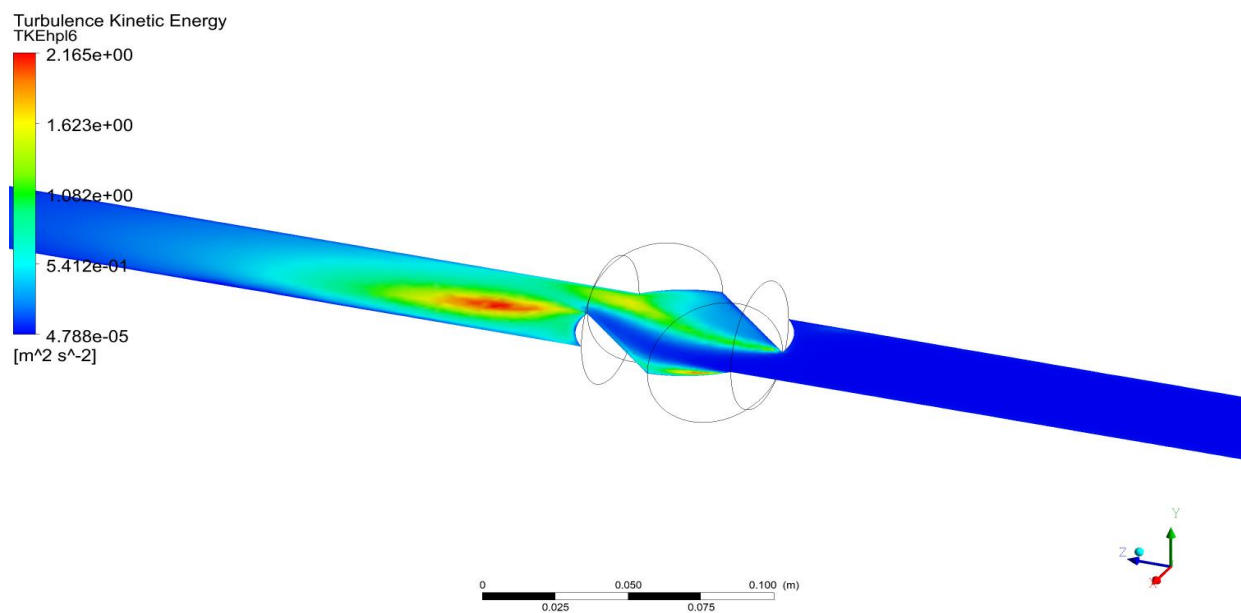
Slika 5.20. a.-c. Promjene kinetičke energije turbulencije  $k$  duž horizontalnih ravnina pri različitim brzinama toka

- $v_{ul}=1,6$  m/s (ulazna brzina toka)



b. Promjena kinetičke energije turbulencije  $k$  duž horizontalne ravnine 6 ( $v_{ul}=1,6$  m/s)

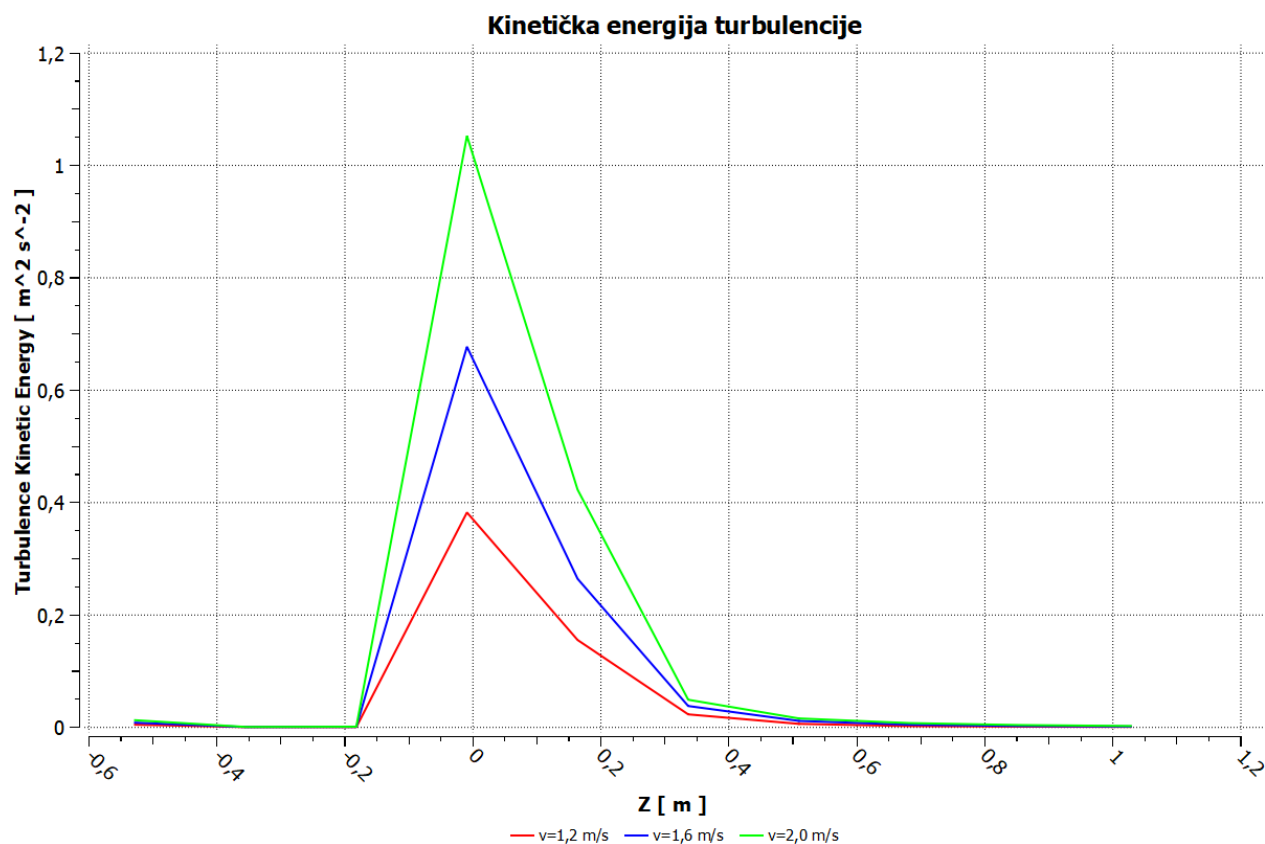
- $v_{ul}=2,0$  m/s (ulazna brzina toka)



c. Promjena kinetičke energije turbulencije  $k$  duž horizontalne ravnine 6 ( $v_{ul}=2,0$  m/s)

Slika 5.20. a.-c. Promjene kinetičke energije turbulencije  $k$  duž horizontalnih ravnina pri različitim brzinama toka, nastavak

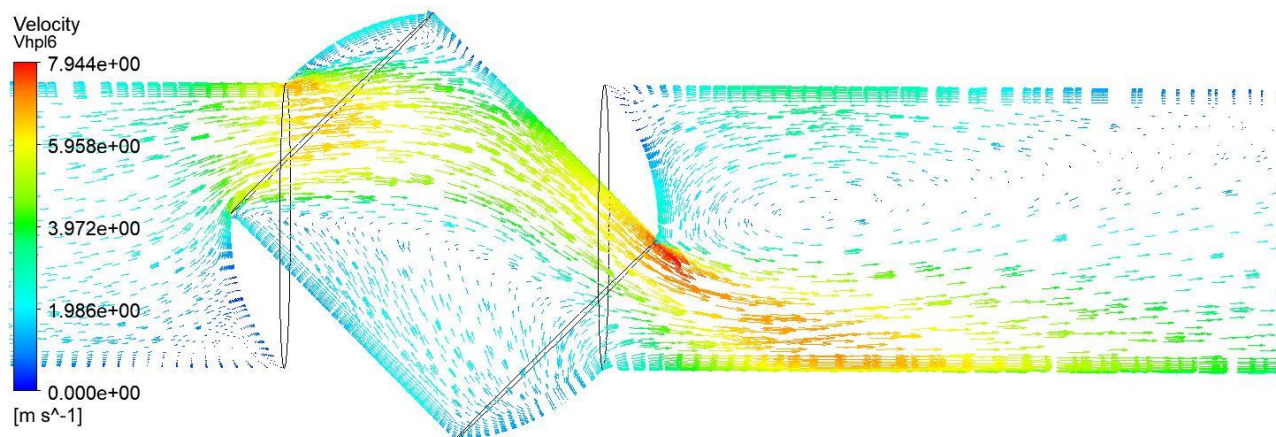
Slikom 5.21. dan je grafički prikaz promjene kinetičke energije turbulencije za sva tri slučaja promjene ulazne brzine toka.



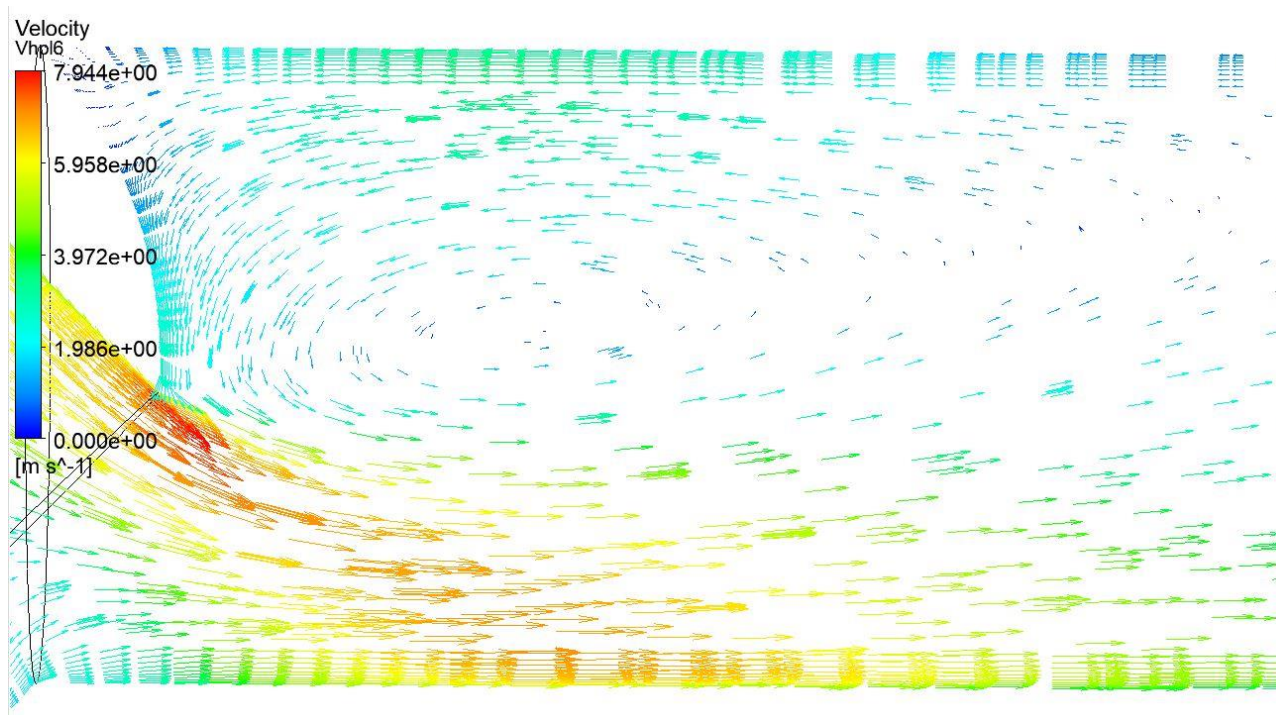
Slika 5.21. Promjena kinetičke energije turbulencije  $k$  u sustavu za tri različite ulazne brzine toka

Kao i u prethodnim primjerima moguće je uočiti poklapanje maksimuma za sva tri slučaja promjene brzine toka. Kinetička energija se ulaskom vode u zatvarač naglo povećava da bi dosegla svoj maksimum, a iza kuglastog zatvarača je opadanje blaže.

U proračun se ušlo sa pretpostavkom kako će se povećanjem ulazne brzine toka povećati i vrijednosti ostalih veličina, što se u konačnici i pokazalo ispravnim razmišljanjem. U dijelu sustava sa maksimalnom vrijednosti kinetičke energije dolazi do pojave turbulencija i formiranja vrtloga (Slika 5.22 i 5.23).



Slika 5.22. Vektorski prikaz promjene brzine toka pri brzini od 2,0 m/s



Slika 5.23. Područje strujanja vode u suprotnom smjeru - formiranje vrtloga

Na slikama 5.22 i 5.23 se mogu uočiti promjene smjera kretanja, te posljedično formiranje vrtloga. Plava boja odnosi se na manje brzine toka koje nastaju prvenstveno zbog geometrije sustava. Položaj zatvarača, odnosno njegov stupanj otvorenosti definira protok vode i brzinu

njezinog prolaska, onemogućujući na taj način formiranje brzina toka približno jednakih vrijednosti neposredno nakon zatvarača. To znači da će na području kontakta cijevi i zatvarača brzine biti maksimalne, a iza zatvarača dolazi do prije spomenutog strujanja u suprotnom smjeru (veliki gradijenti brzine toka).

### **5.3. Treća varijanta hidrauličkog proračuna**

Provedbom treće varijante hidrauličkog proračuna cilj je bio pokazati što će se dogoditi u sustavu ukoliko se njegova geometrija (promjer cijevi) dvostruko, odnosno trostruko poveća. Budući da su unutar ove varijante provedene numeričke simulacije za dvije različite geometrije cijevnog sustava, tako će i ovo poglavlje biti podijeljeno u dva dijela.

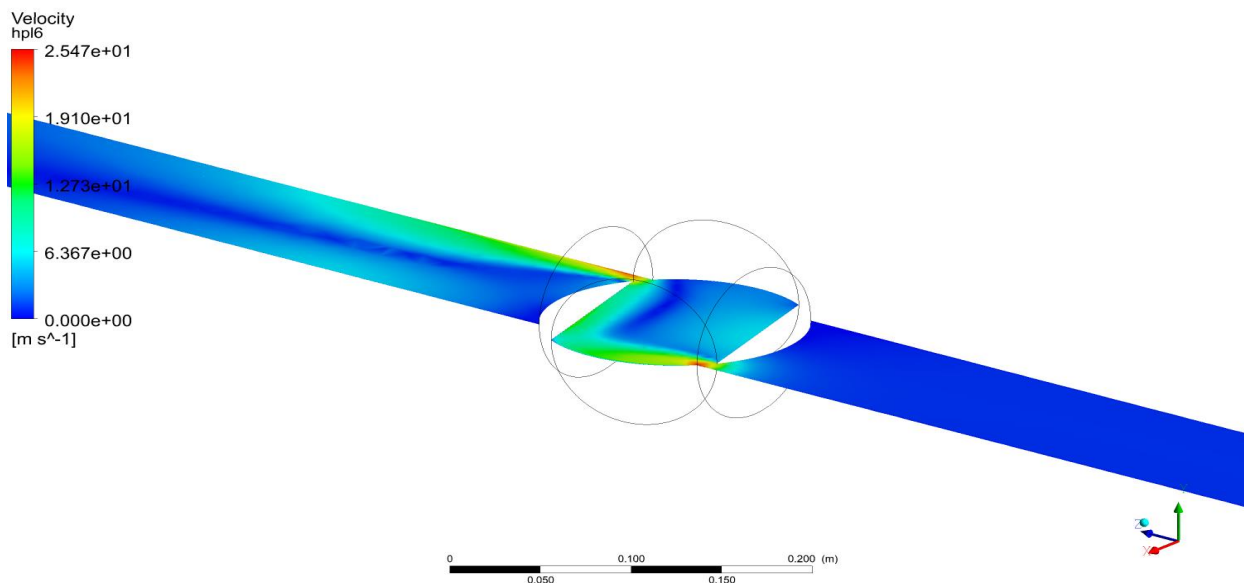
#### ***5.3.1. Varijanta sa promjerom cijevi $D=100$ mm***

Geometrija je dvostruko povećana u odnosu na Varijantu 1, te novi promjer cijevi iznosi  $D=100$  mm. Vrijednost ulazne brzine toka ostaje 1,0 m/s, te kutevi rotacije zatvarača u odnosu na vertikalnu os ostaju jednaki: 15°, 30°, 45°, 60° i 75°. U nastavku su prikazani rezultati brzine toka  $v$ , relativnog ( $p$ ) i ukupnog tlaka ( $p_t$ ), vrtložne viskoznosti  $v_t$  i kinetičke energije turbulencije  $k$ . Razmatra se ponašanje sustava i varijacije navedenih fizikalnih veličina za dvostruko povećanje geometrije u odnosu na početno stanje.

#### **I. Brzina toka fluida**

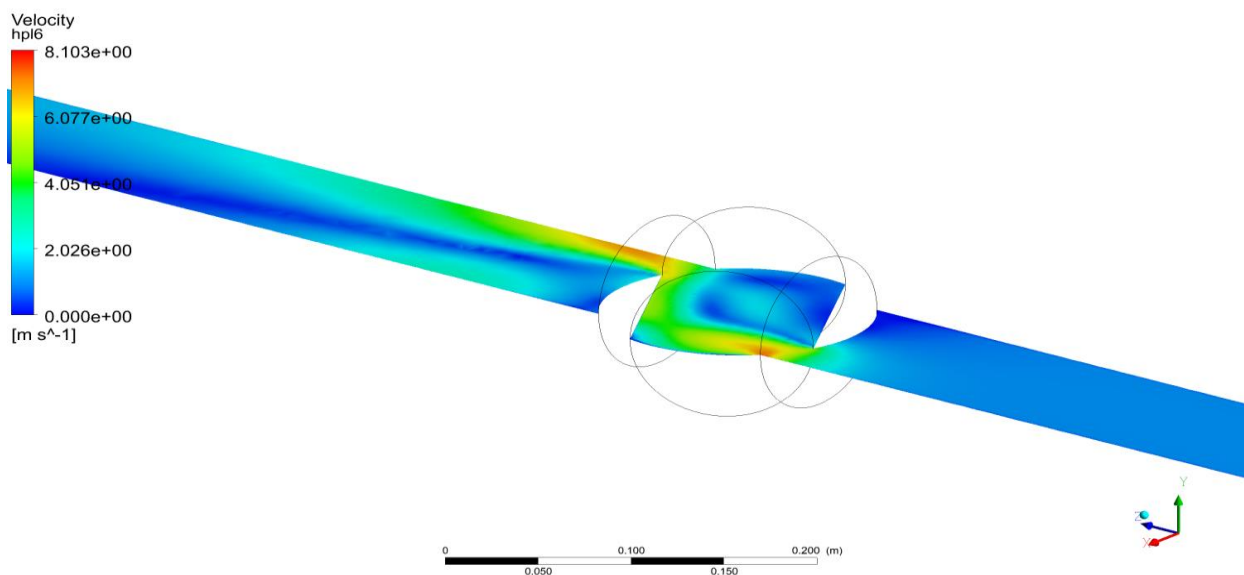
U nastavku su prikazani rezultati vrijednosti maksimalnih i minimalnih brzina toka fluida ovisno o rotaciji zatvarača za 15°, 30°, 45°, 60° i 75° (Slika 5.24.a-e). Pretpostavlja se pojava maksimalnih vrijednosti na kontaktu cijev-zatvarač i zatvarač-cijev, većih u odnosu na Varijantu 1.

- Rotacija zatvarača za  $15^\circ$  u odnosu na vertikalnu os



a. Promjena brzine toka  $v$  duž horizontalne ravnine  $\phi$  (kut rotacije  $15^\circ$ )

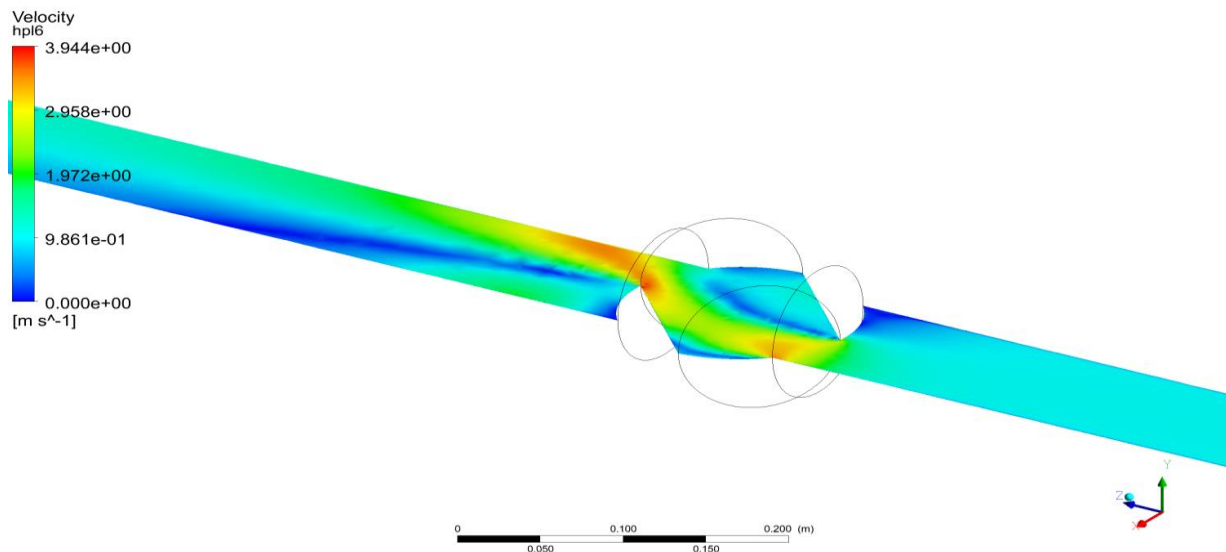
- Rotacija zatvarača za  $30^\circ$  u odnosu na vertikalnu os



b. Promjena brzine toka  $v$  duž horizontalne ravnine  $\phi$  (kut rotacije  $30^\circ$ )

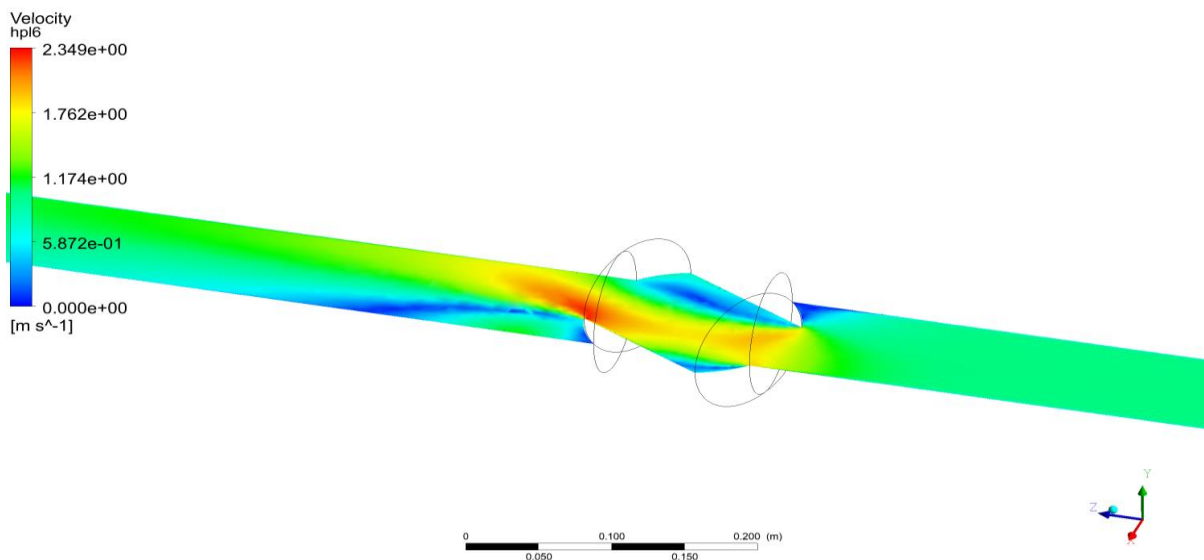
Slika 5.24. a.-e. Promjene brzine toka  $v$  duž horizontalnih ravnina u odnosu na vertikalnu os rotacije

- Rotacija zatvarača za  $45^\circ$  u odnosu na vertikalnu os



c. Promjena brzine toka  $v$  duž horizontalne ravnine 6 (kut rotacije  $45^\circ$ )

- Rotacija zatvarača za  $60^\circ$  u odnosu na vertikalnu os

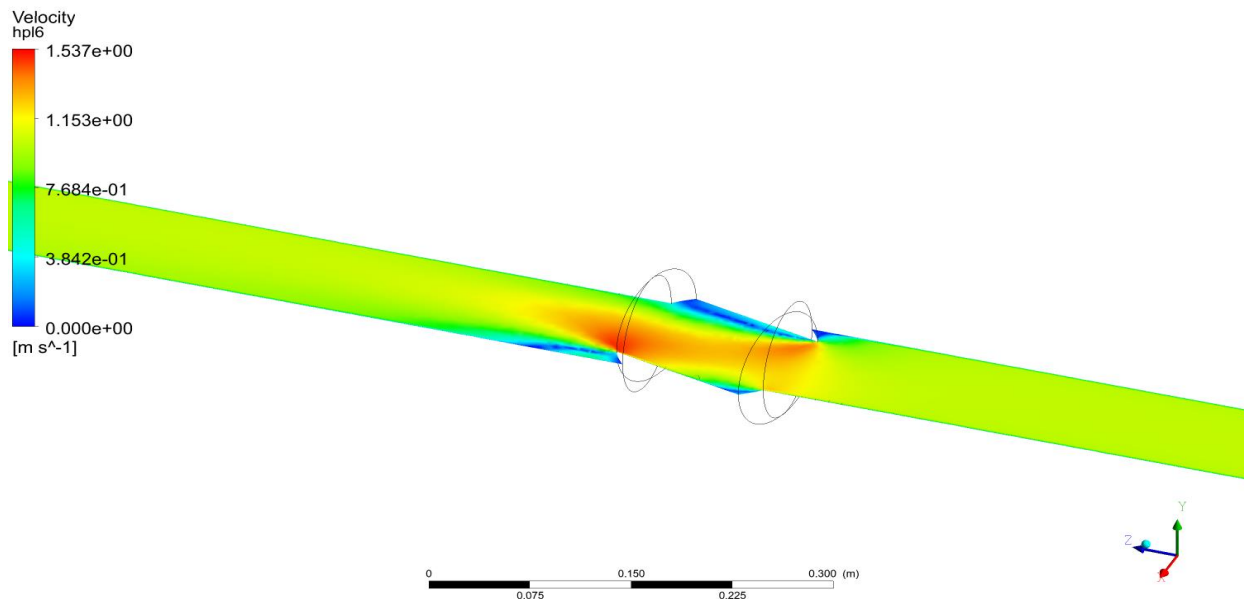


d. Promjena brzine toka  $v$  duž horizontalne ravnine 6 (kut rotacije  $60^\circ$ )

Slika 5.24. a.-e. Promjene brzine toka  $v$  duž horizontalnih ravnina u odnosu na vertikalnu os rotacije, nastavak



- Rotacija zatvarača za  $75^\circ$  u odnosu na vertikalnu os



- e. Promjena brzine toka  $v$  duž horizontalne ravnine 6 (kut rotacije  $75^\circ$ )

Slika 5.24. a.-e. Promjene brzine toka  $v$  duž horizontalnih ravnina u odnosu na vertikalnu os rotacije, nastavak

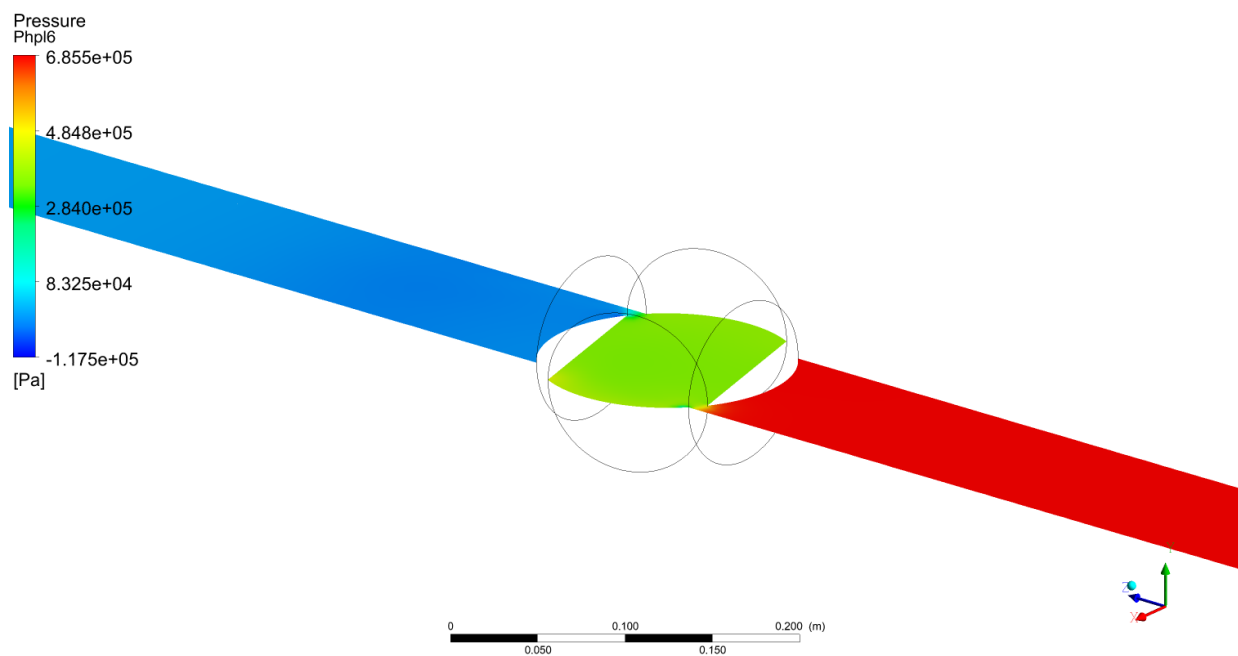
Najveće vrijednosti zabilježene su u slučaju rotacije zatvarača za  $15^\circ$ . Položaj zatvarača je takav da najviše remeti tok fluida i omogućuje stvaranje vrtloga, pa je kao takav najnepovoljniji. Daljnjom rotacijom zatvarača tok fluida se umiruje i manje su varijacije između minimalnih i maksimalnih vrijednosti. Za zaključiti je kako veća otvorenost zatvarača uzrokuje pojavu manjih brzina toka na kontaktu cijevi i kuglastog zatvarača te pridonosi smirenju toka. Sve navedeno rezultira manjom učestalosti vrtloga za takav slučaj položaja zatvarača (rotacija za  $60^\circ$  i  $75^\circ$ ).

## II. Relativni i ukupni tlak

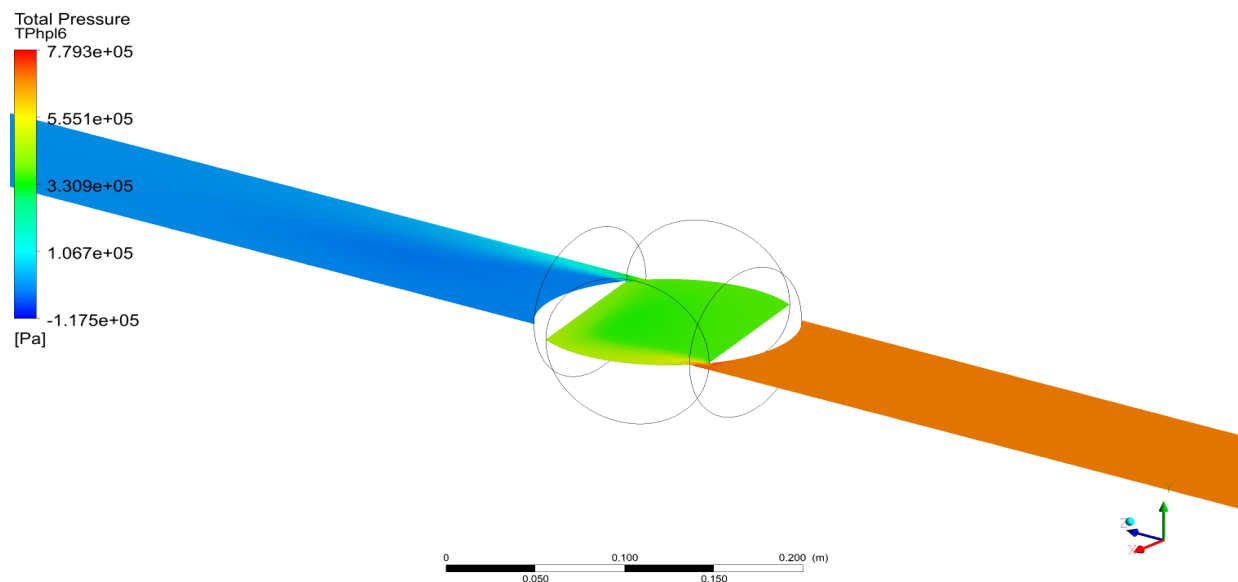
U nastavku su prikazani rezultati vrijednosti relativnog i ukupnog tlaka ovisno o rotaciji zatvarača za  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  i  $75^\circ$ . Pretpostavlja se da će u slučaju najmanje otvorenosti zatvarača biti zabilježene najveće vrijednosti oba tlaka, te da će porastom stupnja otvorenosti doći do smanjenja razlike između maksimalnih i minimalnih vrijednosti tlakova. Slikama

5.25.a-b – 5.29.a-b prikazane su promjene relativnog i ukupnog tlaka duž horizontalne ravnine koja prolazi središtem zatvarača.

- Rotacija zatvarača za  $15^\circ$  u odnosu na vertikalnu os



a. Promjena relativnog tlaka  $p$  duž horizontalne ravnine 6 (kut rotacije  $15^\circ$ )

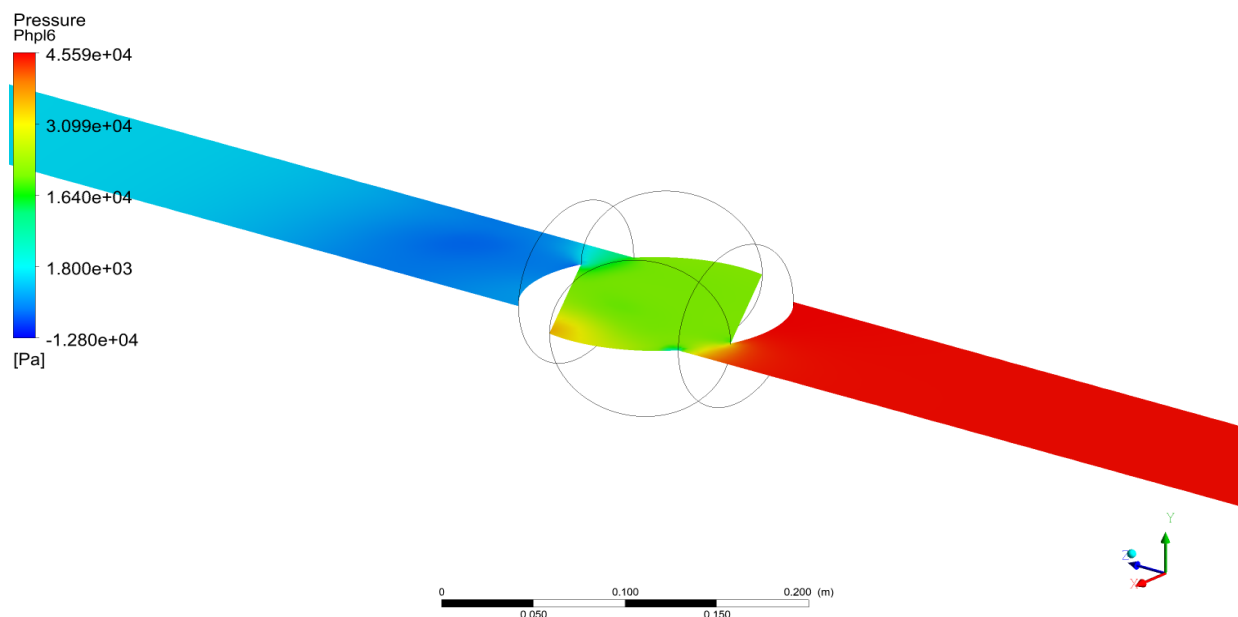


b. Promjena ukupnog tlaka  $p_t$  duž horizontalne ravnine 6 (kut rotacije  $15^\circ$ )

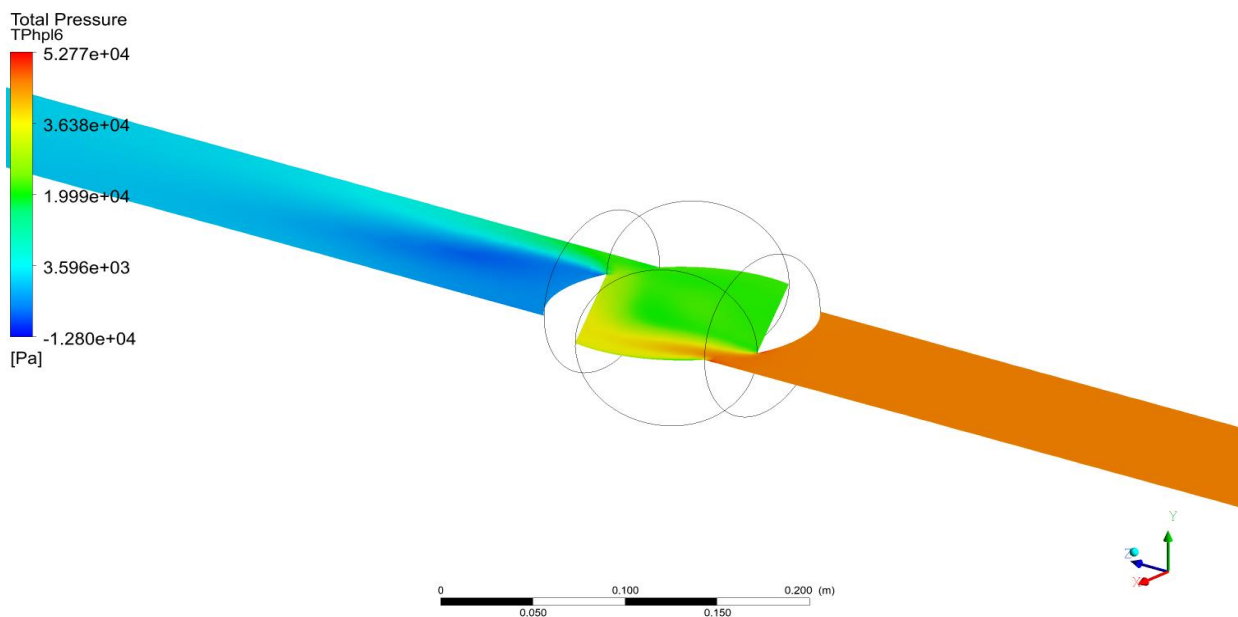
Slika 5.25. a.-b. Promjene relativnog  $p$  i ukupnog tlaka  $p_t$  duž horizontalnih ravnina – kut rotacije  $15^\circ$

Rotacijom zatvarača za  $15^\circ$  od početnog položaja dobiven je najnepovoljniji slučaj. Kao što slike 5.25. a i b prikazuju, nema postepenog opadanja vrijednosti relativnog i ukupnog tlaka.

- Rotacija zatvarača za  $30^\circ$  u odnosu na vertikalnu os



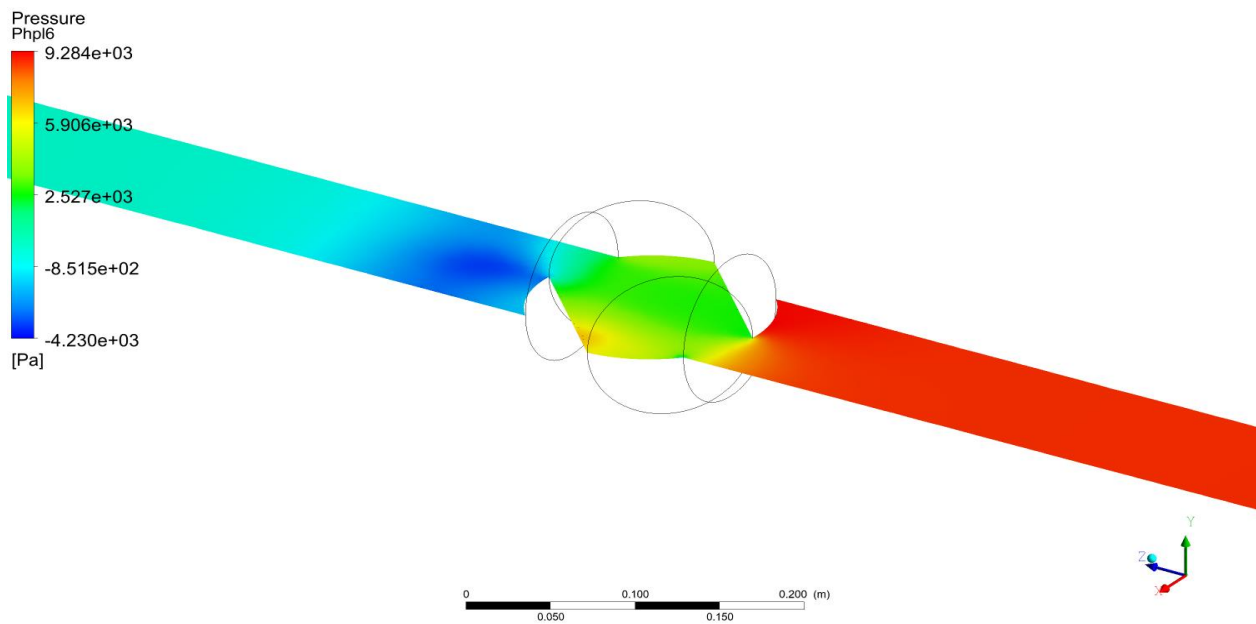
a. Promjena relativnog tlaka  $p$  duž horizontalne ravnine  $\beta$  (kut rotacije  $30^\circ$ )



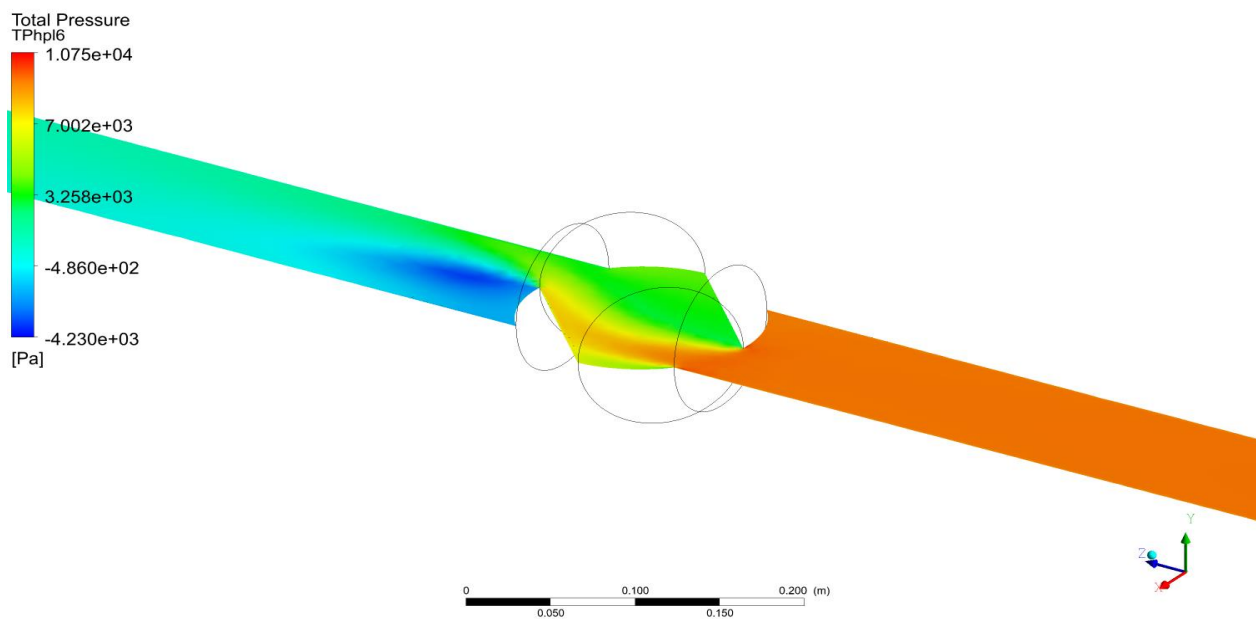
b. Promjena ukupnog tlaka  $p_t$  duž horizontalne ravnine  $\beta$  (kut rotacije  $30^\circ$ )

Slika 5.26. a.-b. Promjene relativnog  $p$  i ukupnog tlaka  $p_t$  duž horizontalnih ravnina – kut rotacije  $30^\circ$

- Rotacija zatvarača za  $45^\circ$  u odnosu na vertikalnu os



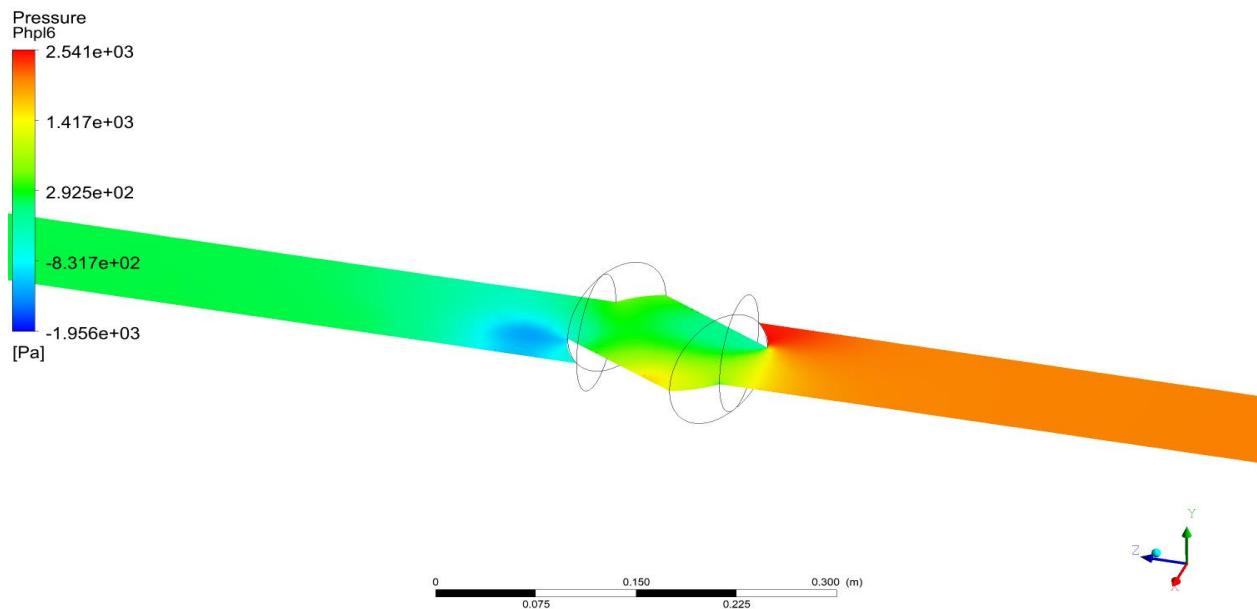
a. Promjena relativnog tlaka  $p$  duž horizontalne ravnine 6 (kut rotacije  $45^\circ$ )



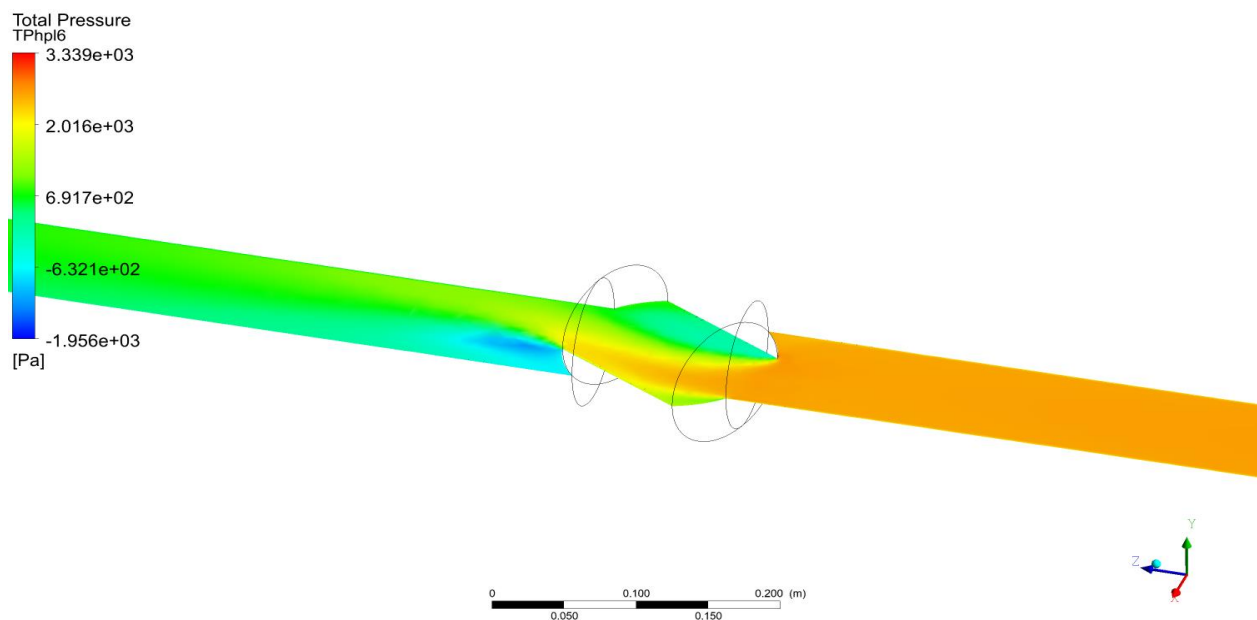
b. Promjena ukupnog tlaka  $p_t$  duž horizontalne ravnine 6 (kut rotacije  $45^\circ$ )

Slika 5.27. a.-b. Promjene relativnog  $p$  i ukupnog tlaka  $p_t$  duž horizontalnih ravnina – kut rotacije  $45^\circ$

- Rotacija zatvarača za  $60^\circ$  u odnosu na vertikalnu os



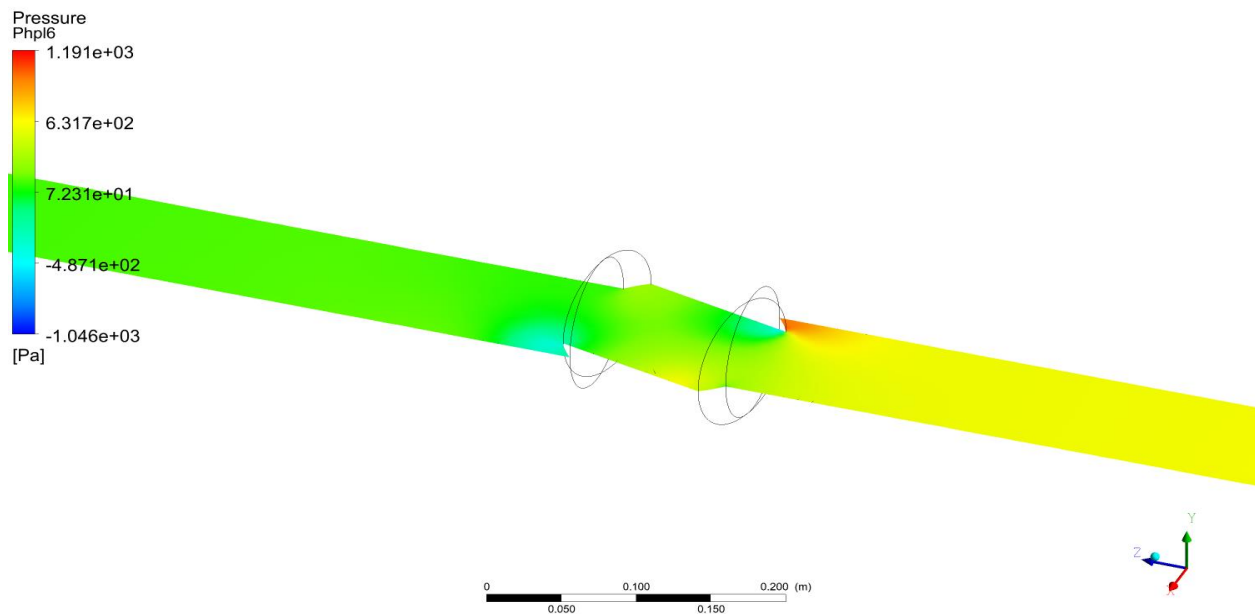
a. Promjena relativnog tlaka  $p$  duž horizontalne ravnine 6 (kut rotacije  $60^\circ$ )



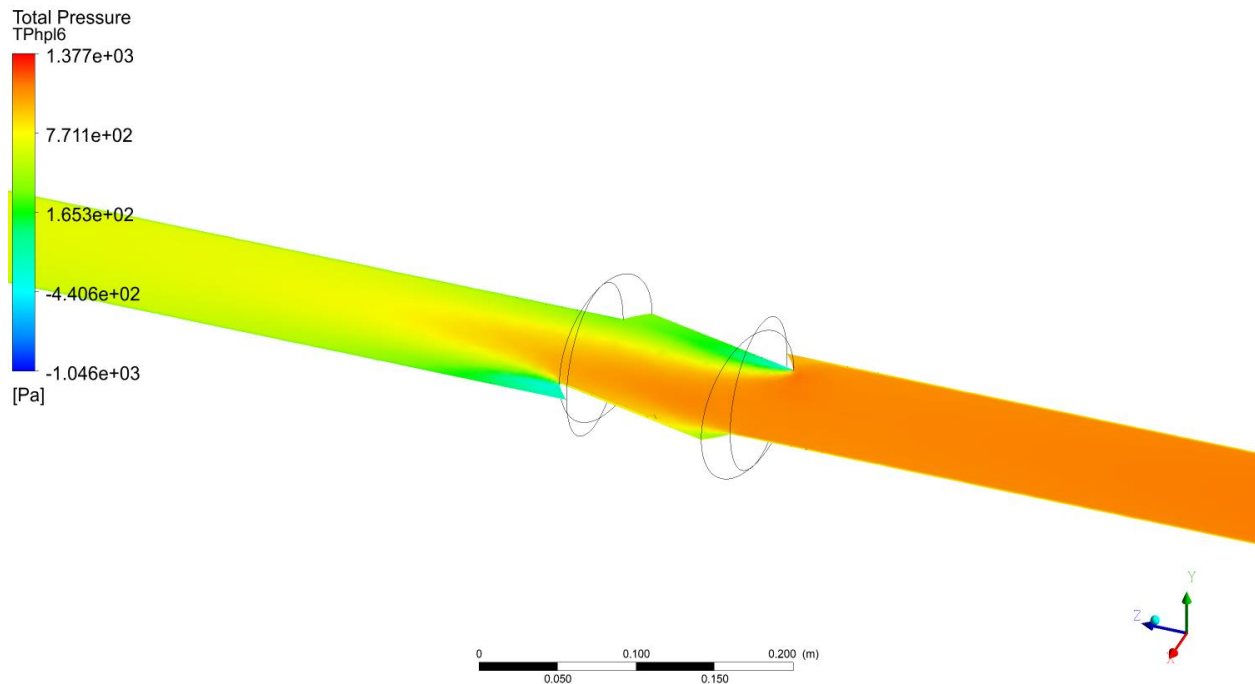
b. Promjena ukupnog tlaka duž horizontalne ravnine 6 (kut rotacije  $60^\circ$ )

Slika 5.28. a.-b. Promjene relativnog  $p$  i ukupnog tlaka  $p_t$  duž horizontalnih ravnina – kut rotacije  $60^\circ$

- Rotacija zatvarača za  $75^\circ$  u odnosu na vertikalnu os



a. Promjena relativnog tlaka  $p$  duž horizontalne ravnine 6 (kut rotacije  $75^\circ$ )



b. Promjena ukupnog tlaka  $p_t$  duž horizontalne ravnine 6 (kut rotacije  $75^\circ$ )

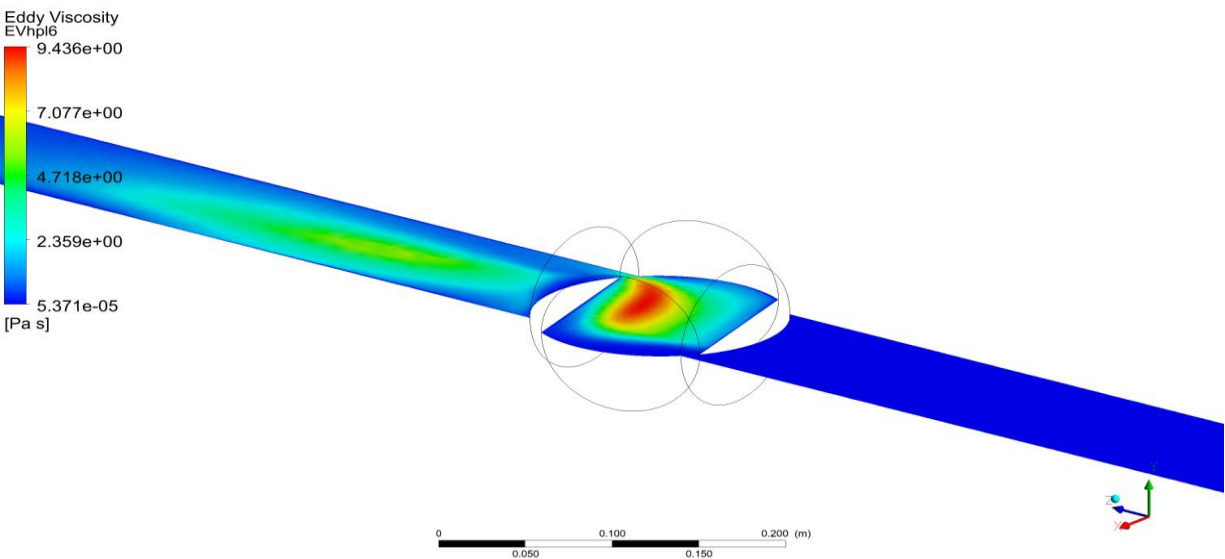
Slika 5.29. a.-b. Promjene relativnog i ukupnog tlaka  $p_t$  duž horizontalnih ravnina – kut rotacije  $75^\circ$

Rotacijom zatvarača za veći stupanj moguće je uočiti manju razliku između ekstremnih vrijednosti tlakova. Najkritičniji dio je kontakt cijevi i zatvarača, budući da tu dolazi do naglih opadanja vrijednosti relativnog i ukupnog tlaka. Kao najnepovoljniji položaj svakako je potrebno izdvojiti prethodno spomenuti slučaj (rotacija zatvarača za  $15^\circ$  u odnosu na vertikalnu os).

### III. Vrtložna viskoznost (*eng. Eddy Viscosity*)

U nastavku su prikazani rezultati vrijednosti vrtložne viskoznosti ovisno o rotaciji zatvarača za  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  i  $75^\circ$ . Pretpostavlja se da će u slučaju najmanje otvorenosti zatvarača biti zabilježene najveće vrijednosti, te da će porastom stupnja otvorenosti doći do smanjenja razlike između ekstrema. Na slikama 5.30.a-e su prikazane promjene vrtložne viskoznosti duž odabrane horizontalne ravnine.

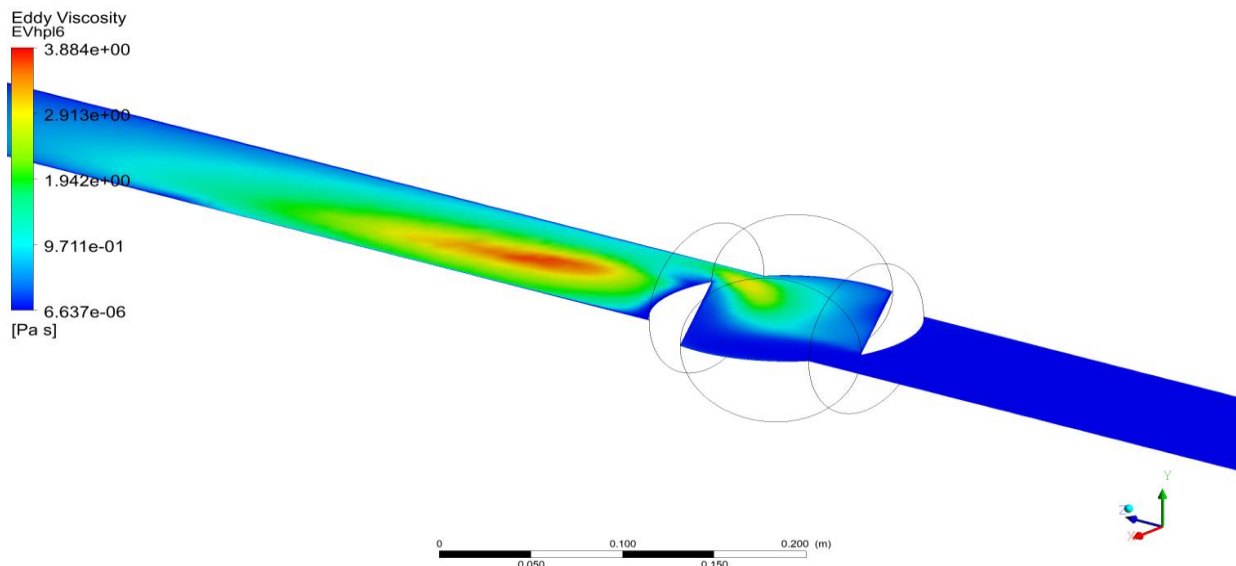
- Rotacija zatvarača za  $15^\circ$  u odnosu na vertikalnu os



a. Promjena vrtložne viskoznosti  $\nu_t$  duž horizontalne ravnine 6 (kut rotacije  $15^\circ$ )

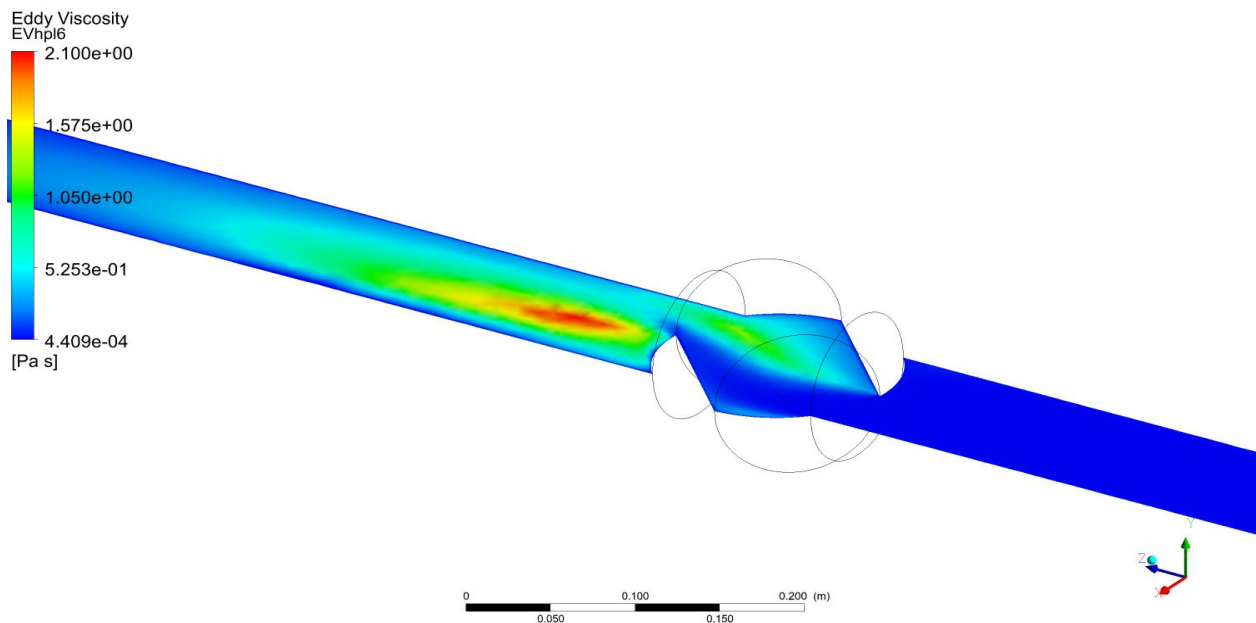
Slika 5.30. a.-e. Promjene vrtložne viskoznosti  $\nu_t$  duž horizontalnih ravnina pri različitim kutovima rotacije u odnosu na vertikalnu os

- Rotacija zatvarača za  $30^\circ$  u odnosu na vertikalnu os



b. Promjena vrtložne viskoznosti  $\nu_t$  duž horizontalne ravnine 6 (kut rotacije  $30^\circ$ )

- Rotacija zatvarača za  $45^\circ$  u odnosu na vertikalnu os

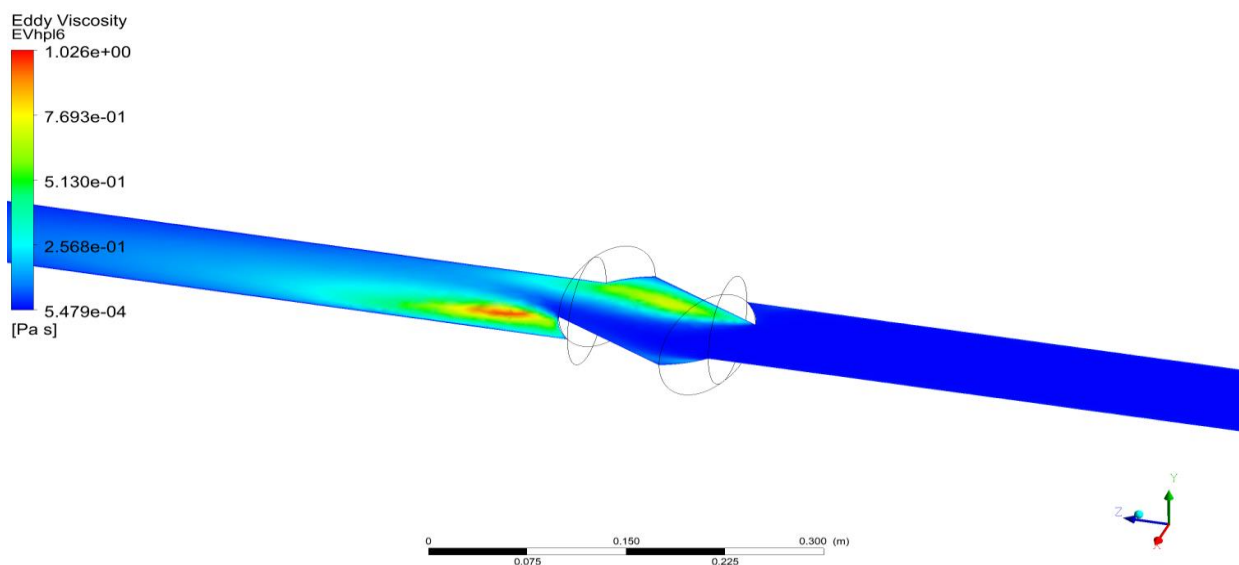


c. Promjena vrtložne viskoznosti  $\nu_t$  duž horizontalne ravnine 6 (kut rotacije  $45^\circ$ )

Slika 5.30. a.-e. Promjene vrtložne viskoznosti  $\nu_t$  duž horizontalnih ravnina pri različitim kutevima rotacije u odnosu na vertikalnu os, nastavak

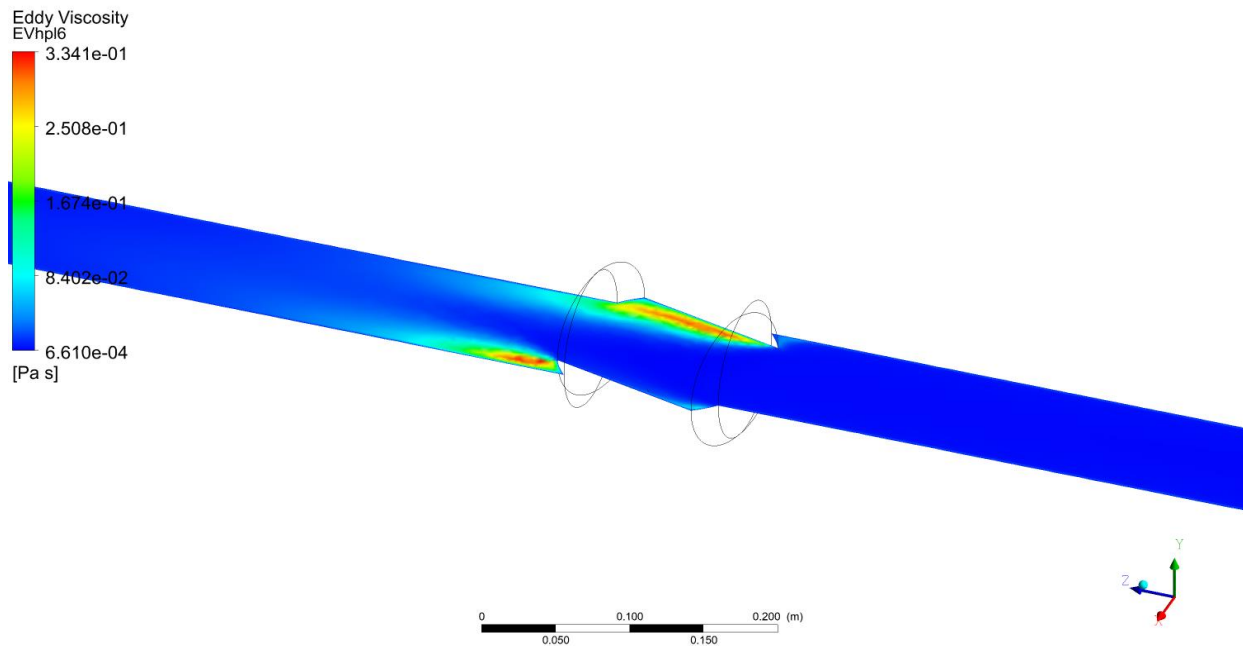


- Rotacija zatvarača za  $60^\circ$  u odnosu na vertikalnu os



d. Promjena vrtložne viskoznosti  $\nu_t$  duž horizontalne ravnine 6 (kut rotacije  $60^\circ$ )

- Rotacija zatvarača za  $75^\circ$  u odnosu na vertikalnu os



e. Promjena vrtložne viskoznosti  $\nu_t$  duž horizontalne ravnine 6 (kut rotacije  $75^\circ$ )

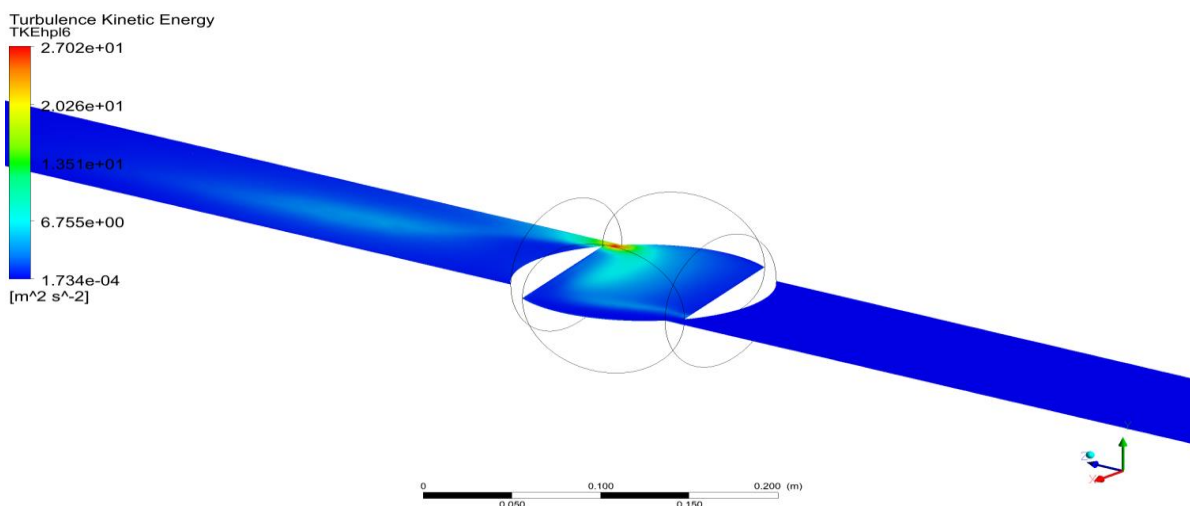
Slika 5.30. a.-e. Promjene vrtložne viskoznosti  $\nu_t$  duž horizontalnih ravnina pri različitim kutevima rotacije u odnosu na vertikalnu os, nastavak

Rotacijom zatvarača za veći stupanj dolazi do smanjenja razlike između ekstrema. U prvom slučaju rotacije zatvarača za  $15^\circ$  u odnosu na vertikalnu os najveće vrijednosti su zabilježene u području zatvarača. Razlog za to je minimalna otvorenost zatvarača uslijed koje voda, koja dolazi sa maksimalnom brzinom toka i pritiskom, ne može brže protjeći tim dijelom sustava te dolazi do pojave maksimalne vrtložnosti. Povećanjem stupnja rotacije strujanje fluida u zatvaraču se umiruje i vrtložno strujanje nastaje u području iza zatvarača.

#### IV. Kinetička energija turbulencije (*eng. Turbulence Kinetic Energy*)

U nastavku su prikazani rezultati vrijednosti kinetičke energije turbulencije ovisno o rotaciji zatvarača za  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  i  $75^\circ$ . Pretpostavlja se da će u slučaju najmanje otvorenosti zatvarača biti zabilježene najveće vrijednosti, te da će porastom stupnja otvorenosti zatvarača doći do smanjenja razlike između ekstrema. Na slikama 5.31.a-e su prikazane promjene kinetičke energije turbulencije duž odabrane horizontalne ravnine. Kao i u prethodnim varijantama, razmatra se moguće podudaranje maksimalnih vrijednosti sa već analiziranim fizikalnim veličinama, poput vrtložne viskoznosti.

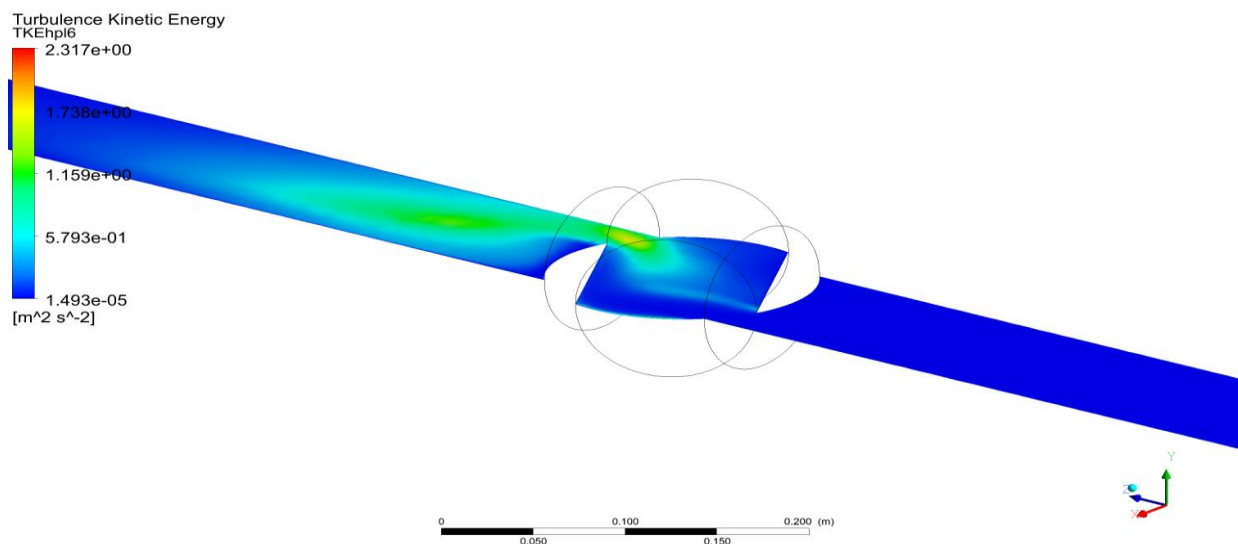
- Rotacija zatvarača za  $15^\circ$  u odnosu na vertikalnu os



- a. Promjena kinetičke energije turbulencije  $k$  duž horizontalne ravnine 6 (kut rotacije  $15^\circ$ )

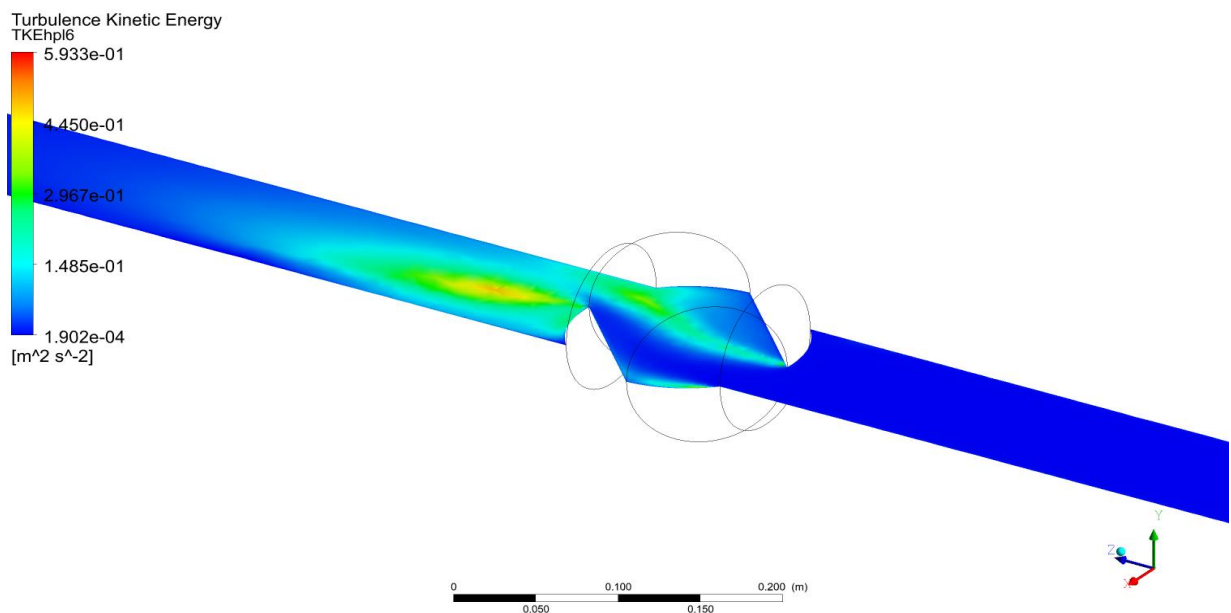
Slika 5.31. a.-e. Promjene kinetičke energije turbulencije  $k$  duž horizontalnih ravnina pri različitim kutovima rotacije u odnosu na vertikalnu os

- Rotacija zatvarača za  $30^\circ$  u odnosu na vertikalnu os



b. Promjena kinetičke energije turbulencije  $k$  duž horizontalne ravnine 6 (kut rotacije  $30^\circ$ )

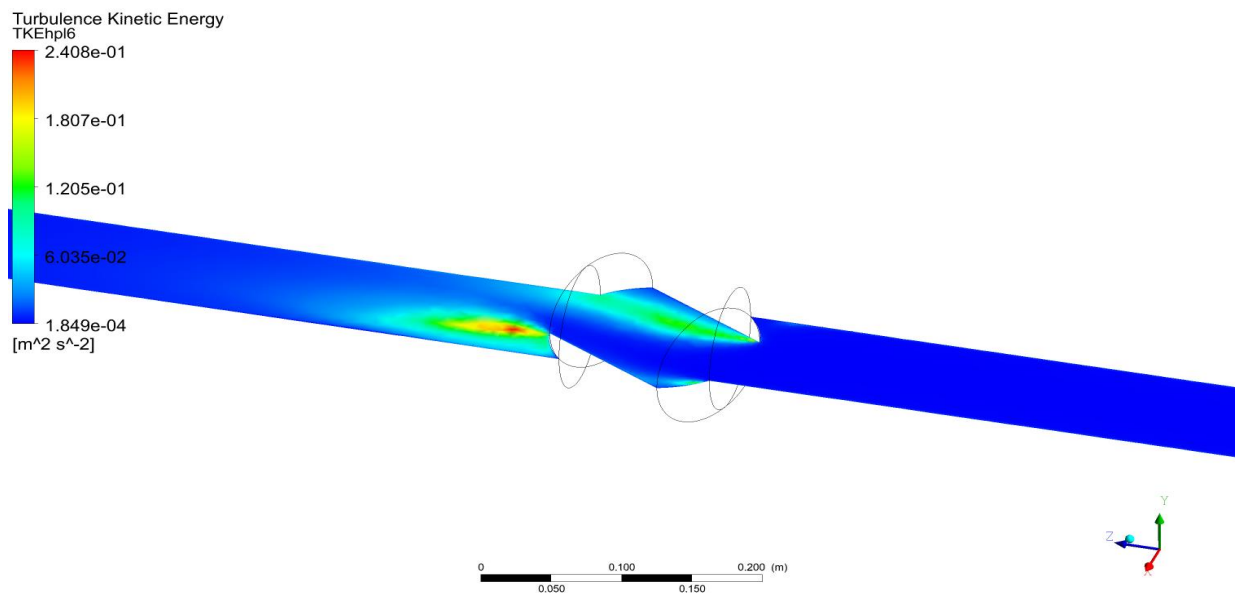
- Rotacija zatvarača za  $45^\circ$  u odnosu na vertikalnu os



c. Promjena kinetičke energije turbulencije  $k$  duž horizontalne ravnine 6 (kut rotacije  $45^\circ$ )

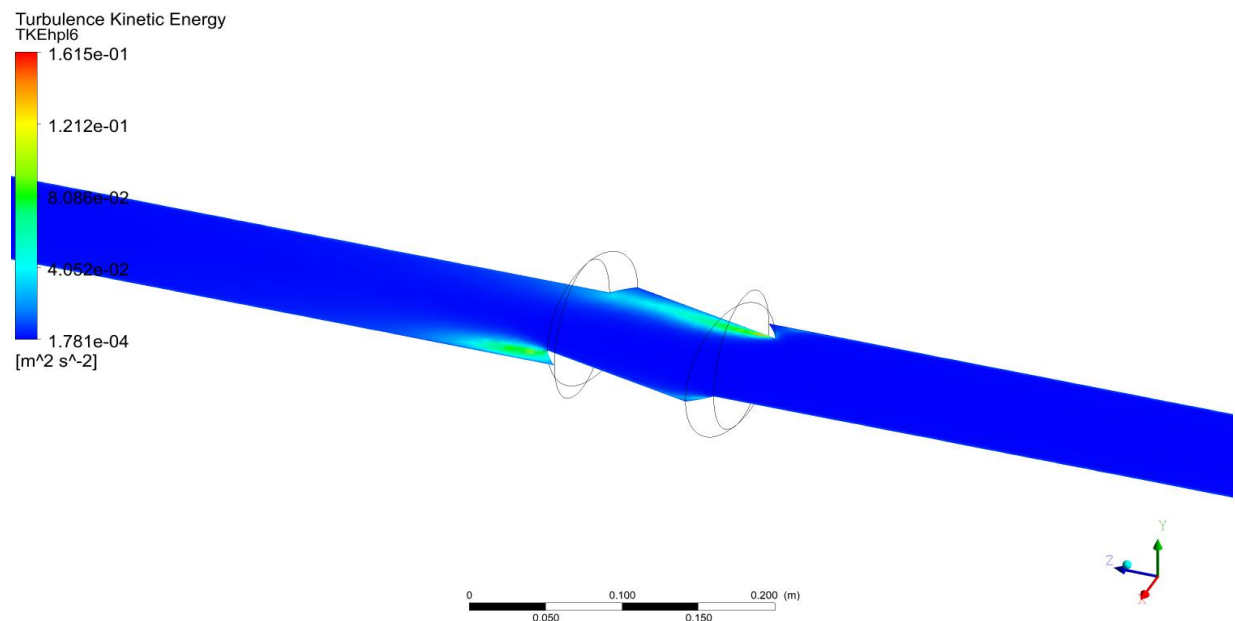
Slika 5.31. a.-e. Promjene kinetičke energije turbulencije  $k$  duž horizontalnih ravnina pri različitim kutevima rotacije u odnosu na vertikalnu os, nastavak

- Rotacija zatvarača za  $60^\circ$  u odnosu na vertikalnu os



d. Promjena kinetičke energije turbulencije  $k$  duž horizontalne ravnine 6 (kut rotacije  $60^\circ$ )

- Rotacija zatvarača za  $75^\circ$  u odnosu na vertikalnu os



e. Promjena kinetičke energije turbulencije  $k$  duž horizontalne ravnine 6 (kut rotacije  $75^\circ$ )

Slika 5.31. a.-e. Promjene kinetičke energije turbulencije  $k$  duž horizontalnih ravnina pri različitim kutevima rotacije u odnosu na vertikalnu os, nastavak

Rotacijom zatvarača za veći stupanj dolazi do smanjenja razlike između ekstrema. U dijelu sustava od ulaza do zatvarača nema promjene, te su tamo zabilježene minimalne vrijednosti kinetičke energije, budući da je poprečni presjek konstantan (cijev) i nema fizičkih prepreka strujanju vode. Za prvi slučaj rotacije zatvarača za  $15^\circ$  u odnosu na vertikalnu os najveće vrijednosti su zabilježene na kontaktu zatvarač-cijev. Daljnjom rotacijom zatvarača maksimalne vrijednosti kinetičke energije se pojavljuju upravo na onome dijelu gdje su zabilježene maksimalne vrijednosti vrtložne viskoznosti. Može se zaključiti kako je najnepovoljniji slučaj rotacije zatvarača za  $15^\circ$ , a najpovoljniji slučaj rotacije za  $60^\circ$  i  $75^\circ$ .

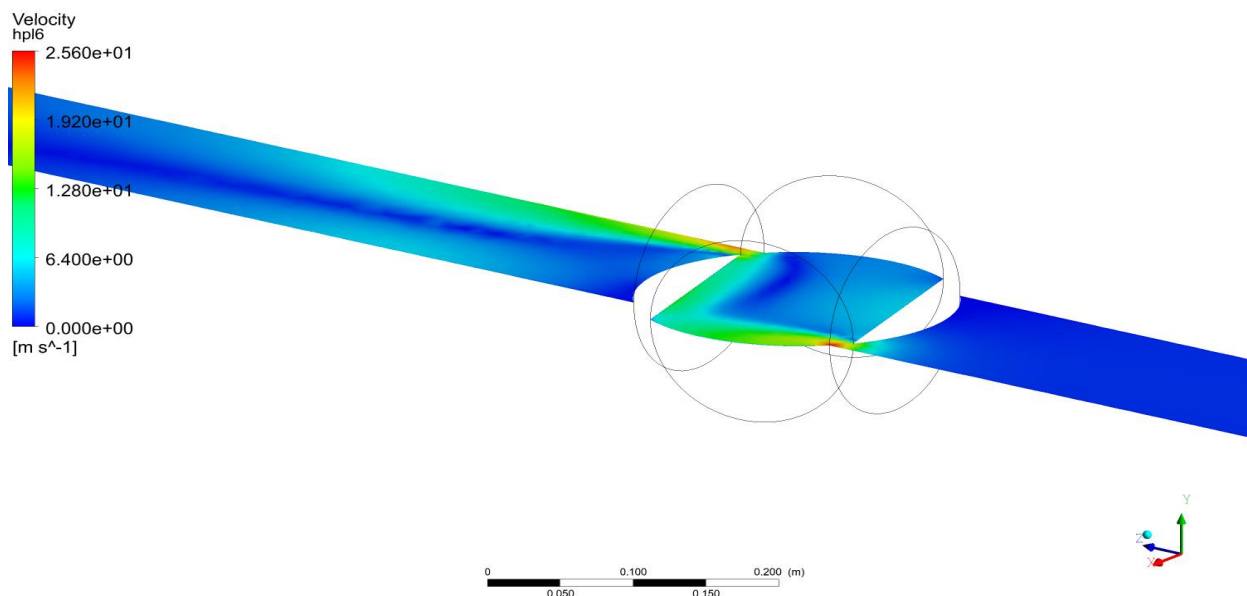
### **5.3.2. Varijanta sa promjerom cijevi $D=150$ mm**

Geometrija je trostruko povećana u odnosu na Varijantu 1, te novi promjer cijevi iznosi  $D=150$  mm. Vrijednost ulazne brzine toka ostaje  $1,0$  m/s, te kutevi rotacije zatvarača u odnosu na vertikalnu os ostaju jednaki:  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  i  $75^\circ$ . U nastavku su prikazani rezultati brzine toka  $v$ , relativnog ( $p$ ) i ukupnog tlaka ( $p_t$ ), vrtložne viskoznosti  $v_t$  i kinetičke energije turbulencije  $k$ . Razmatra se ponašanje sustava i varijacije navedenih fizikalnih veličina za trostruko povećanje geometrije u odnosu na početno stanje.

#### **I. Brzina toka fluida**

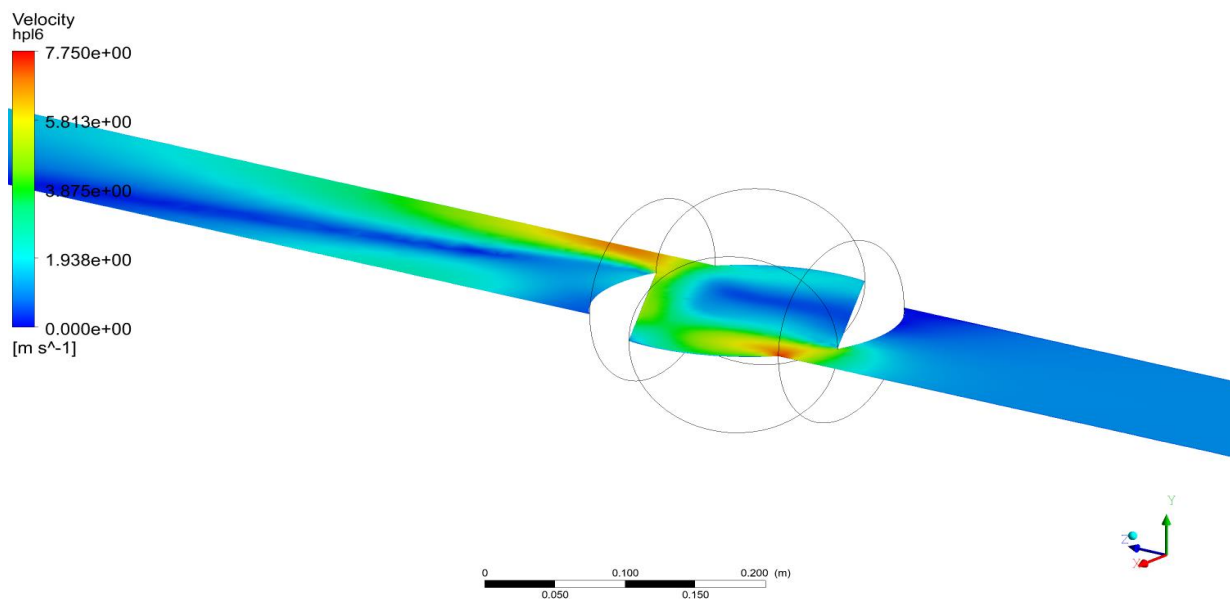
U nastavku su prikazani rezultati vrijednosti maksimalnih i minimalnih brzina toka fluida ovisno o rotaciji zatvarača za  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  i  $75^\circ$ . Pretpostavlja se pojava maksimalnih vrijednosti na kontaktu cijev-zatvarač i zatvarač-cijev. Za prikaz rezultata odabrana je horizontalno položena ravnina koja prolazi središtem zatvarača, odnosno koordinatama  $(0,0,0)$ . Na slikama 5.32.a-e moguće je promatrati promjenu brzine toka u ovisnosti o stupnju rotacije kuglastog zatvarača.

- Rotacija zatvarača za  $15^\circ$  u odnosu na vertikalnu os



a. Promjena brzine toka  $v$  duž horizontalne ravnine 6 (kut rotacije  $15^\circ$ )

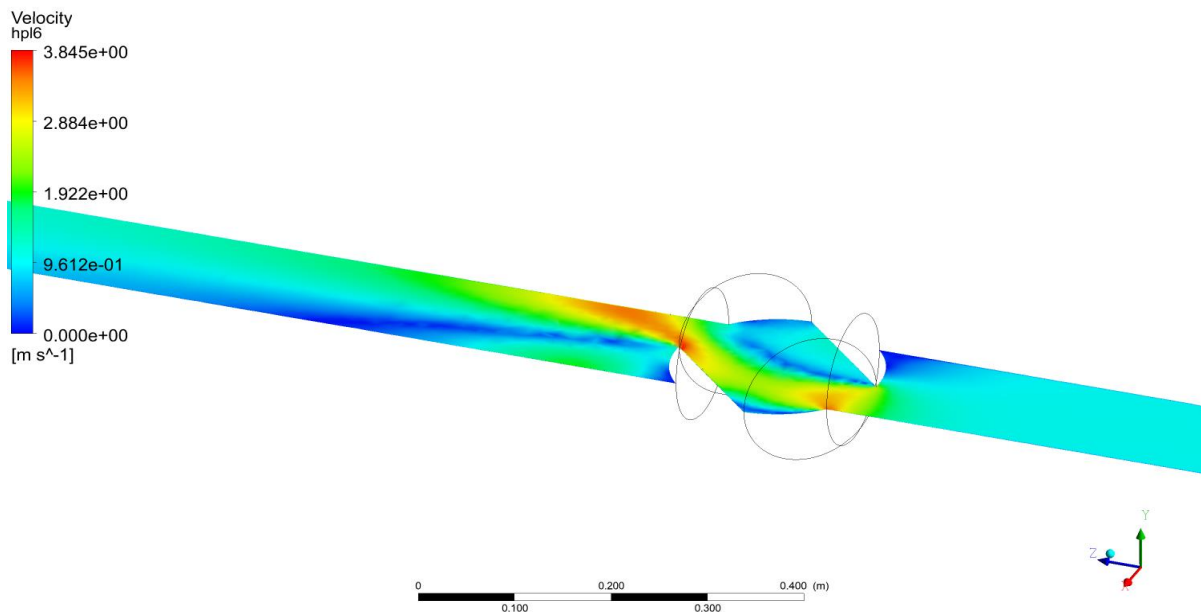
- Rotacija zatvarača za  $30^\circ$  u odnosu na vertikalnu os



b. Promjena brzine toka  $v$  duž horizontalne ravnine 6 (kut rotacije  $30^\circ$ )

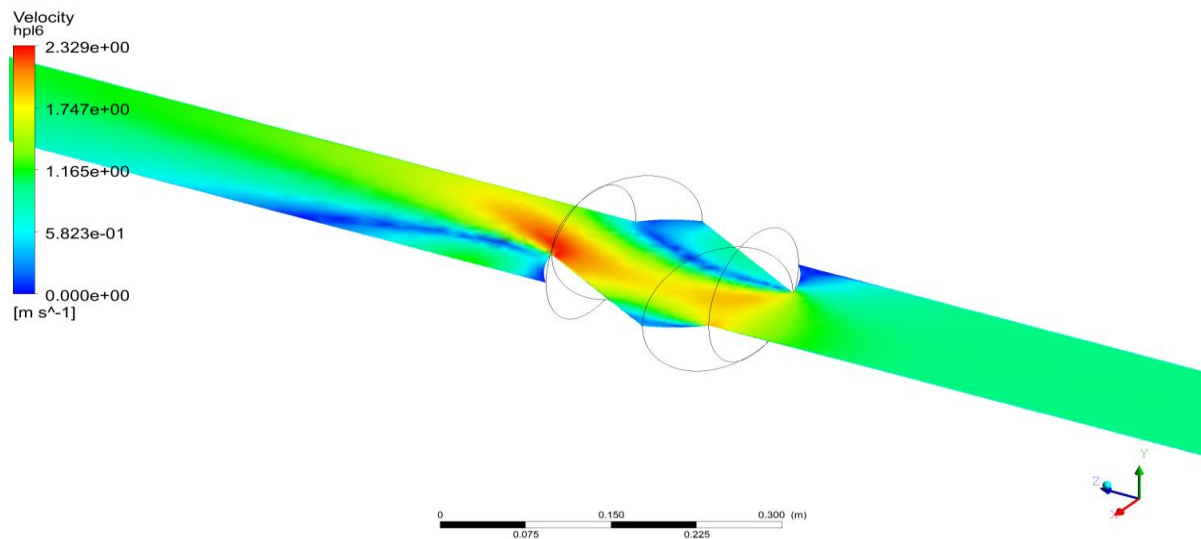
Slika 5.32. a-e. Promjene brzine toka  $v$  duž horizontalnih ravnina pri različitim kutevima u odnosu na vertikalnu os rotacije

- Rotacija zatvarača za  $45^\circ$  u odnosu na vertikalnu os



c. Promjena brzine toka  $v$  duž horizontalne ravnine 6 (kut rotacije  $45^\circ$ )

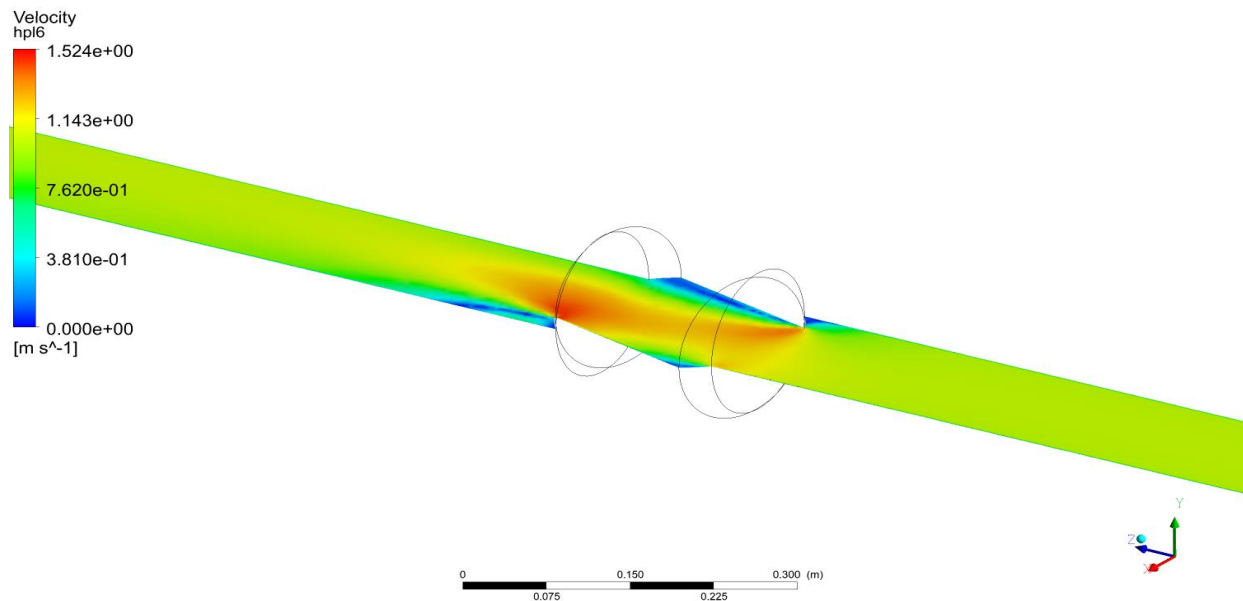
- Rotacija zatvarača za  $60^\circ$  u odnosu na vertikalnu os



d. Promjena brzine toka  $v$  duž horizontalne ravnine 6 (kut rotacije  $60^\circ$ )

Slika 5.32. a.-e. Promjene brzine toka  $v$  duž horizontalnih ravnina pri različitim kutevima u odnosu na vertikalnu os rotacije, nastavak

- Rotacija zatvarača za  $75^\circ$  u odnosu na vertikalnu os



- e. Promjena brzine toka  $v$  duž horizontalne ravnine 6 (kut rotacije  $75^\circ$ )

Slika 5.32. a.-e. Promjene brzine toka  $v$  duž horizontalnih ravnina pri različitim kutevima u odnosu na vertikalnu os rotacije, nastavak

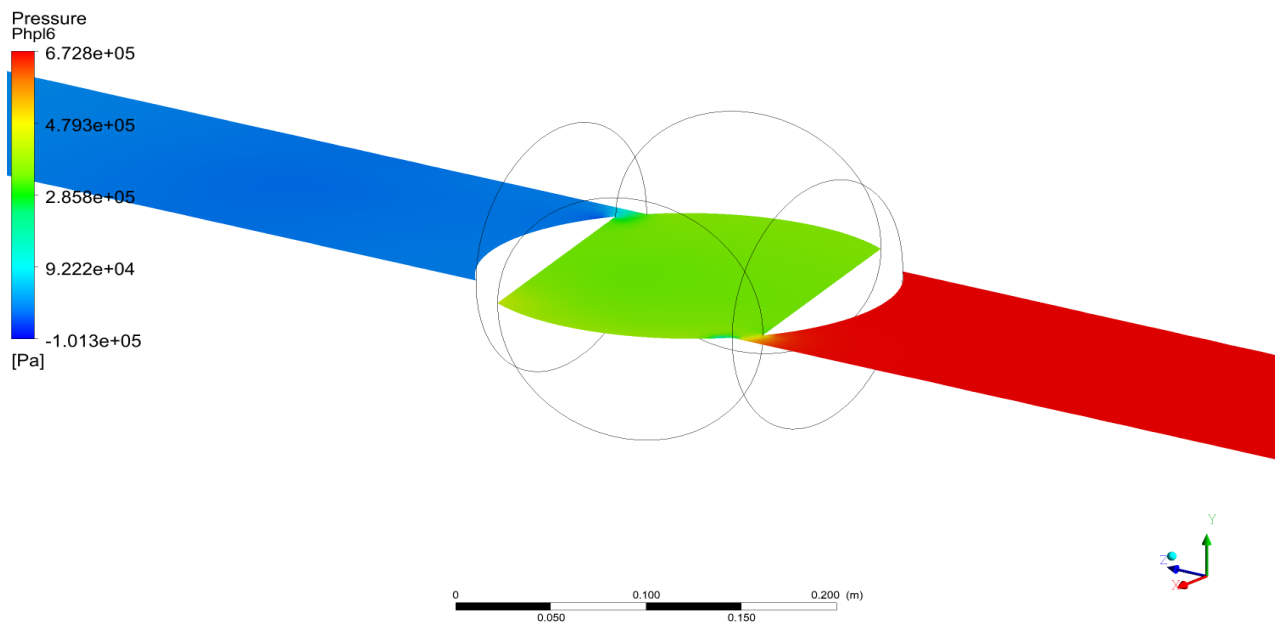
Najveće vrijednosti zabilježene su u slučaju rotacije kuglastog zatvarača za  $15^\circ$ . Položaj zatvarača najviše remeti tok fluida i omogućuje stvaranje vrtloga, pa je kao takav najnepovoljniji. Daljnjom rotacijom kuglastog zatvarača tok fluida se umiruje i manje su varijacije između minimalnih i maksimalnih vrijednosti brzina toka. Maksimalne vrijednosti su koncentrirane na području zatvarača, posebice na izlazu iza njega.

## II. Relativni i ukupni tlak

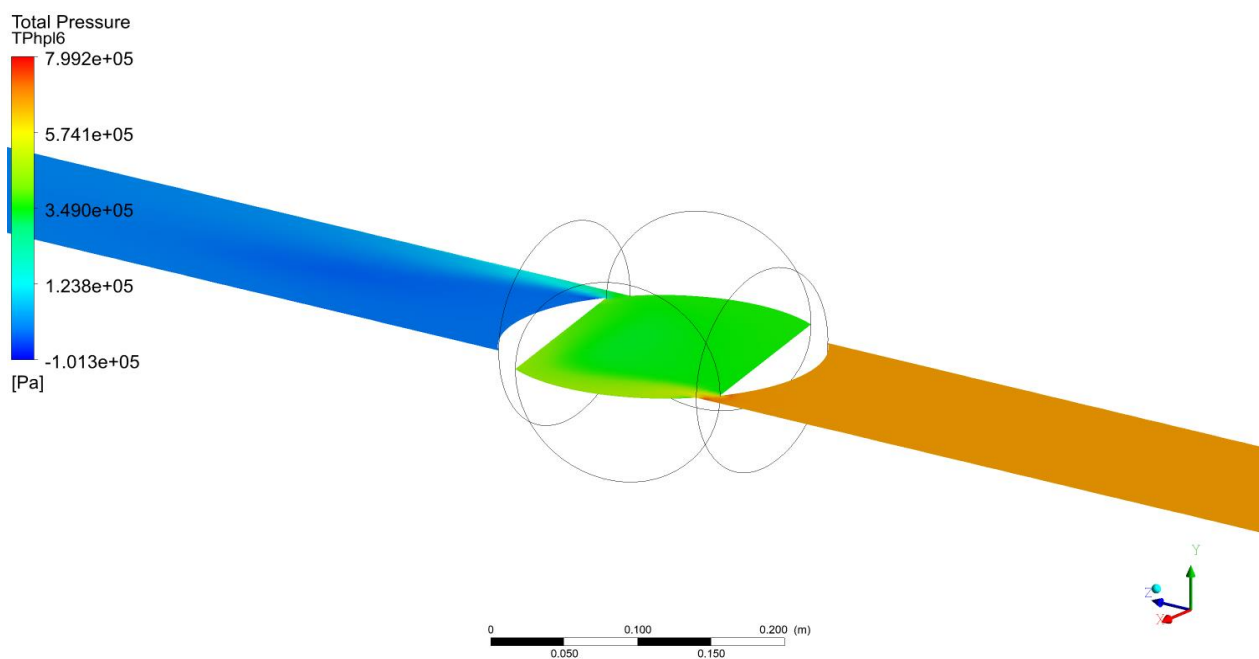
U nastavku su prikazani rezultati vrijednosti relativnog i ukupnog tlaka ovisno o rotaciji kuglastog zatvarača za  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  i  $75^\circ$ . Pretpostavlja se da će u slučaju najmanje otvorenosti zatvarača biti zabilježene najveće vrijednosti oba tlaka, te da će porastom stupnja otvorenosti zatvarača doći do smanjenja razlike između maksimalnih i minimalnih vrijednosti. Za prikaz rezultata odabrana je horizontalno položena ravnina koja prolazi središtem zatvarača, odnosno koordinatama  $(0,0,0)$ . Na slikama 5.33.a-b – 5.37.a-b moguće je promotriti promjenu relativnog i ukupnog tlaka u ovisnosti o stupnju rotacije zatvarača.



- Rotacija zatvarača za  $15^\circ$  u odnosu na vertikalnu os



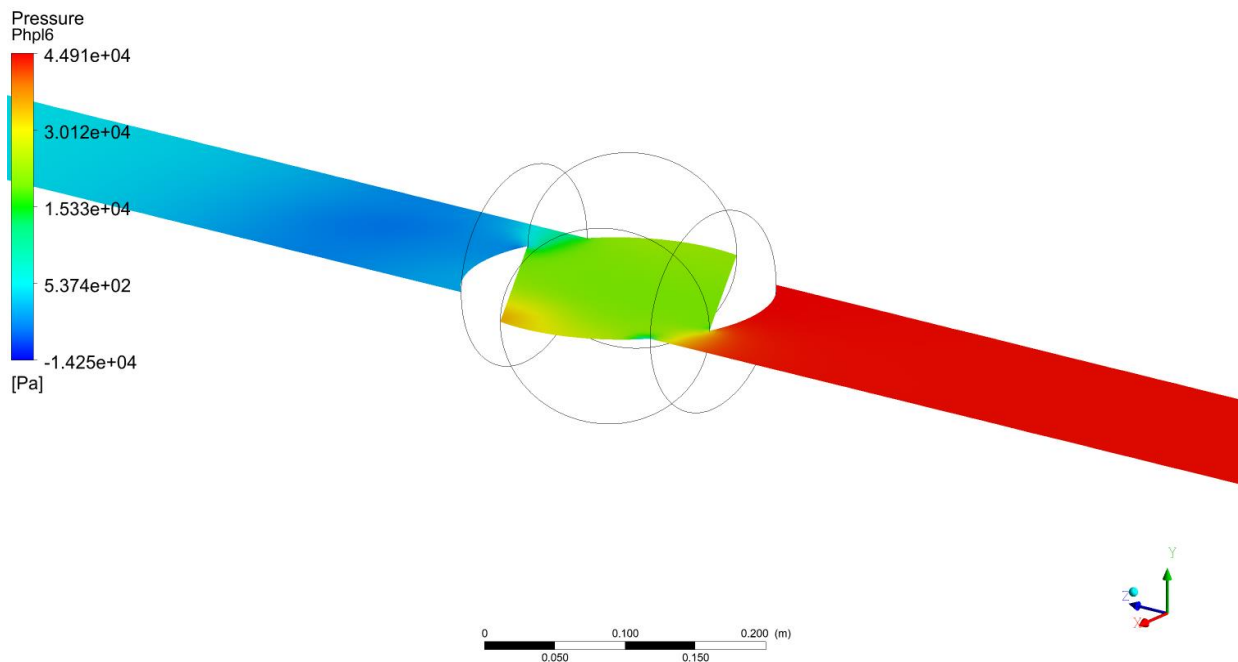
a. Promjena relativnog tlaka  $p$  duž horizontalne ravnine 6 (kut rotacije  $15^\circ$ )



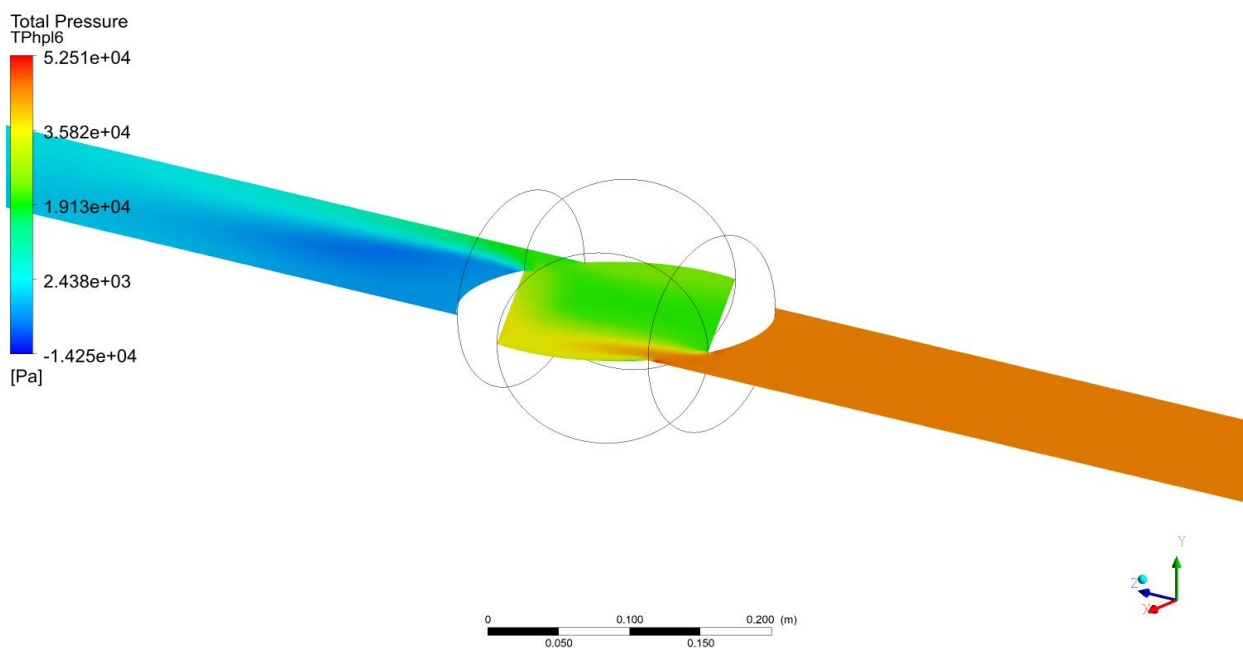
b. Promjena ukupnog tlaka  $p_t$  duž horizontalne ravnine 6 (kut rotacije  $15^\circ$ )

Slika 5.33. a.-b. Promjene relativnog  $p$  i ukupnog tlaka  $p_t$  duž horizontalnih ravnina – kut rotacije  $15^\circ$

- Rotacija zatvarača za  $30^\circ$  u odnosu na vertikalnu os



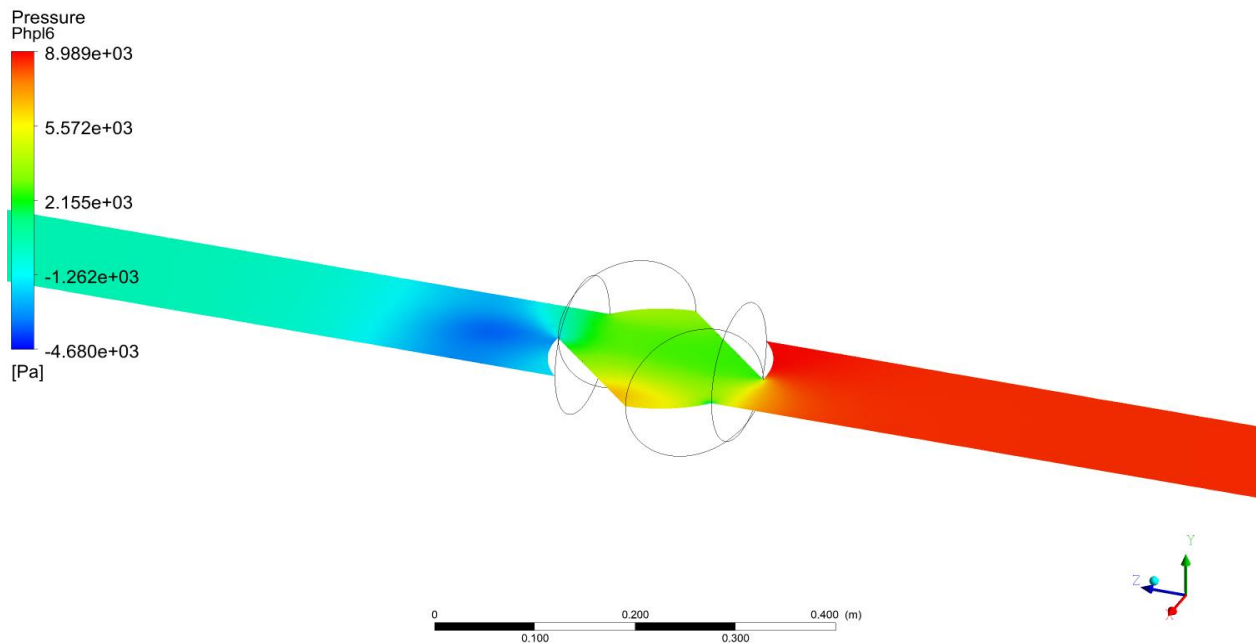
a. Promjena relativnog tlaka  $p$  duž horizontalne ravnine 6 (kut rotacije  $30^\circ$ )



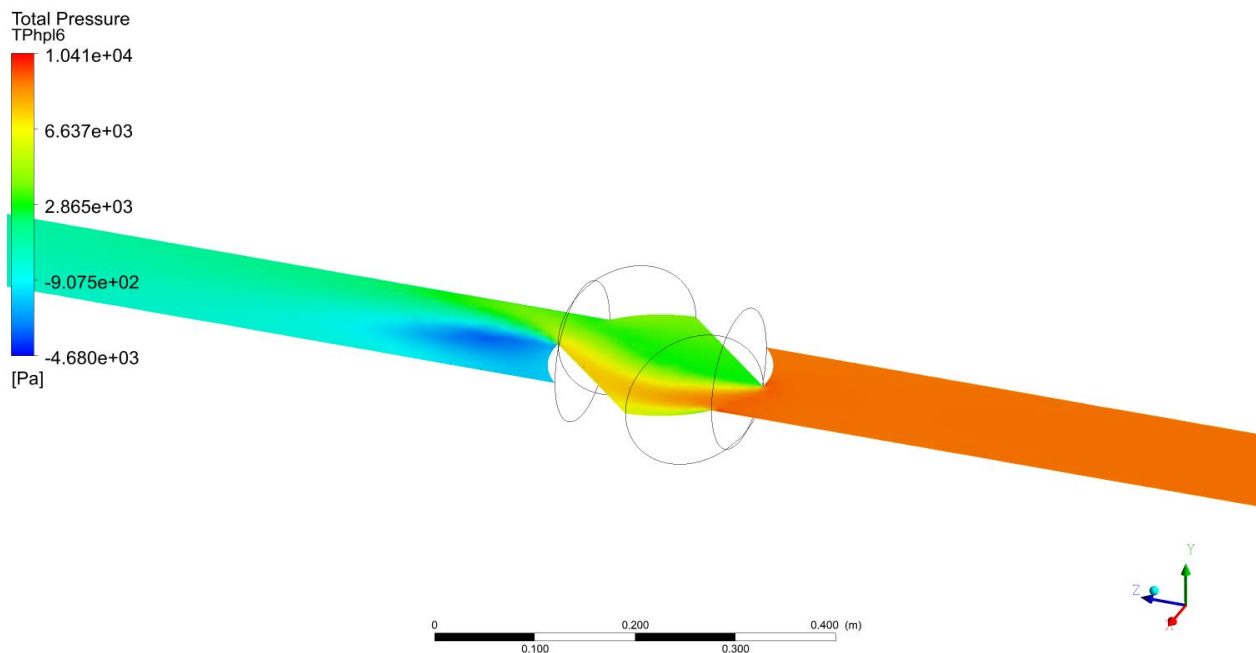
b. Promjena ukupnog tlaka  $p_t$  duž horizontalne ravnine 6 (kut rotacije  $30^\circ$ )

Slika 5.34. a.-b. Promjene relativnog  $p$  i ukupnog tlaka  $p_t$  duž horizontalnih ravnina – kut rotacije  $30^\circ$

- Rotacija zatvarača za  $45^\circ$  u odnosu na vertikalnu os



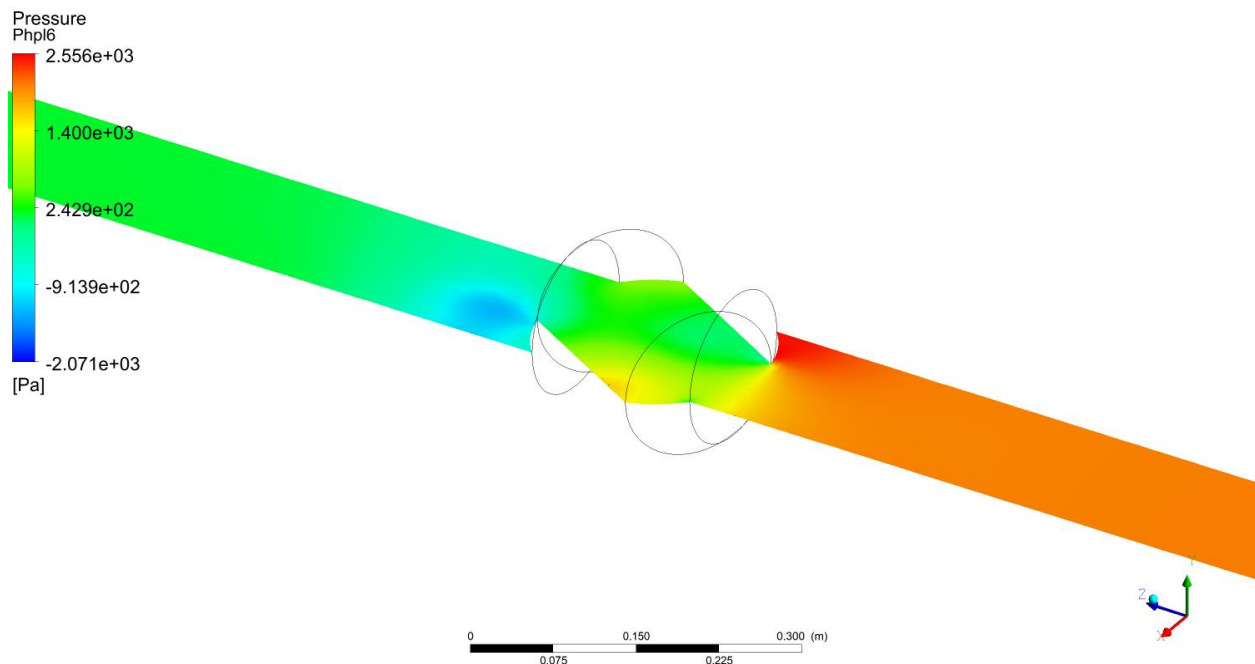
a. Promjena relativnog tlaka  $p$  duž horizontalne ravnine 6 (kut rotacije  $45^\circ$ )



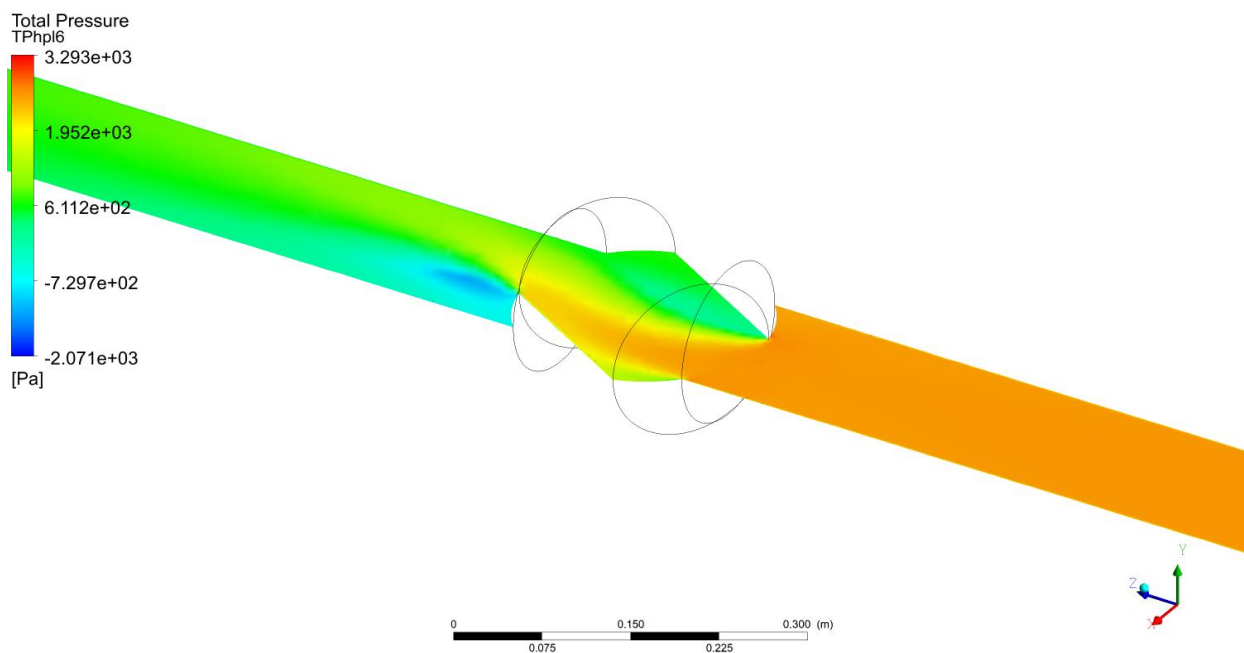
b. Promjena ukupnog tlaka  $p_t$  duž horizontalne ravnine 6 (kut rotacije  $45^\circ$ )

Slika 5.35. a.-b. Promjene relativnog  $p$  i ukupnog tlaka  $p_t$  duž horizontalnih ravnina – kut rotacije  $45^\circ$

- Rotacija zatvarača za  $60^\circ$  u odnosu na vertikalnu os



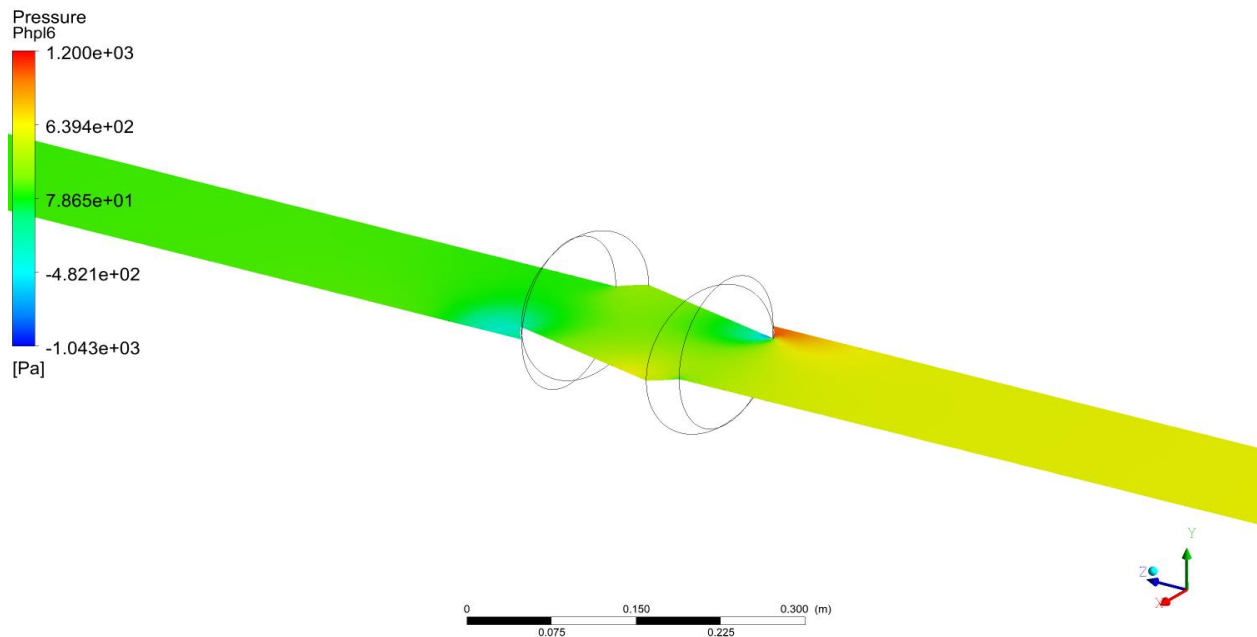
a. Promjena relativnog tlaka  $p$  duž horizontalne ravnine 6 (kut rotacije  $60^\circ$ )



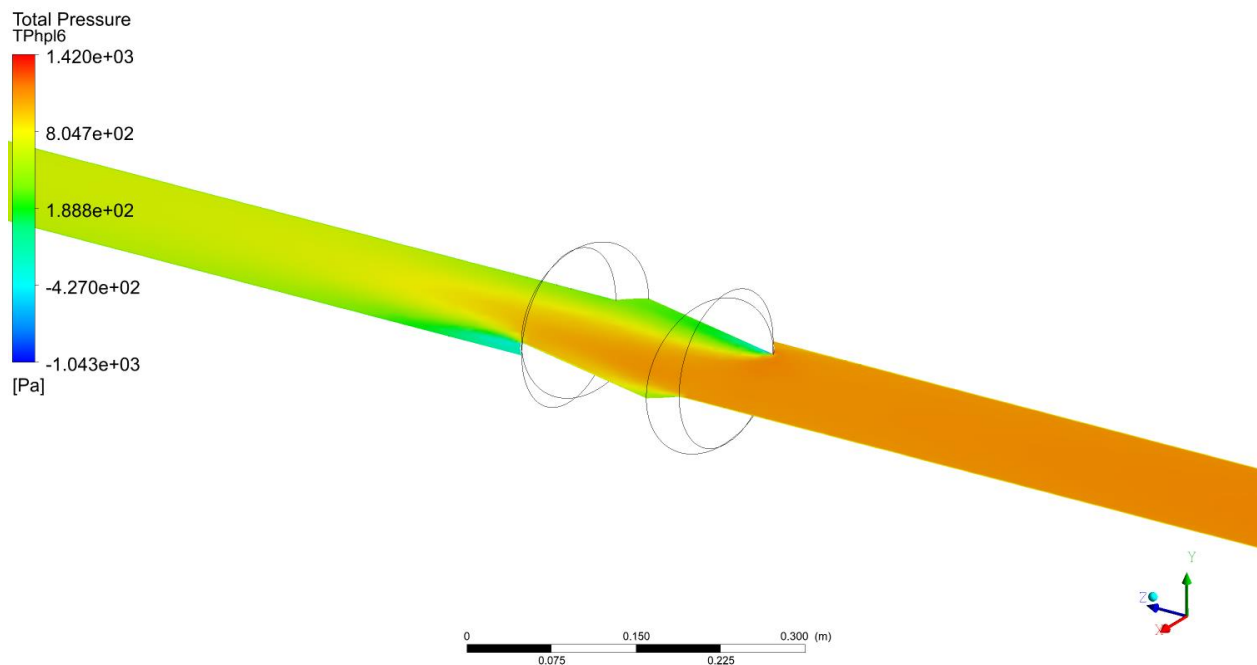
b. Promjena ukupnog tlaka  $p_t$  duž horizontalne ravnine 6 (kut rotacije  $60^\circ$ )

Slika 5.36. a.-b. Promjene relativnog  $p$  i ukupnog tlaka  $p_t$  duž horizontalnih ravnina – kut rotacije  $60^\circ$

- Rotacija zatvarača za  $75^\circ$  u odnosu na vertikalnu os



a. Promjena relativnog tlaka  $p$  duž horizontalne ravnine 6 (kut rotacije  $75^\circ$ )



b. Promjena ukupnog tlaka  $p_t$  duž horizontalne ravnine 6 (kut rotacije  $75^\circ$ )

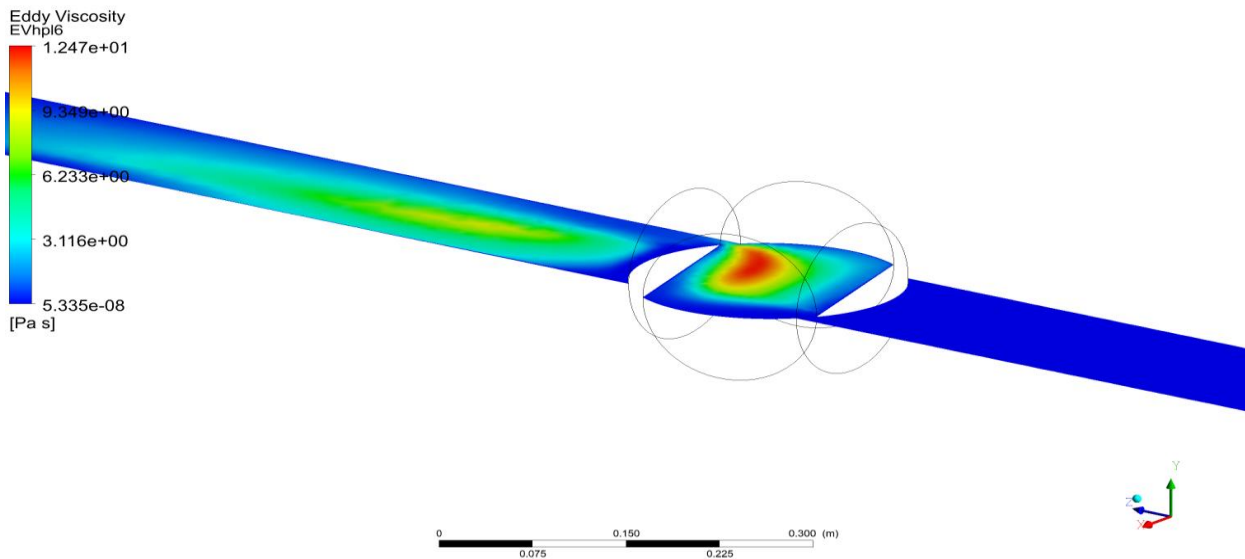
Slika 5.37. a.-b. Promjene relativnog  $p$  i ukupnog tlaka  $p_t$  duž horizontalnih ravnina – kut rotacije  $75^\circ$

Rotacijom zatvarača za veći stupanj moguće je uočiti manju razliku između ekstrema. Najkritičniji dio je kontakt cijevi i zatvarača, budući da tu dolazi do naglih opadanja vrijednosti relativnog i ukupnog tlaka. Kao najnepovoljniji položaj svakako je potrebno izdvojiti slučaj rotacije zatvarača za  $15^\circ$  u odnosu na vertikalnu os. U slučaju rotacije zatvarača za  $75^\circ$  u sustavu se pojavljuju najmanje vrijednosti tlakova, budući da je geometrija zatvarača takva da najmanje remeti tok fluida.

### III. Vrtložna viskoznost (*eng. Eddy Viscosity*)

U nastavku su prikazani rezultati vrijednosti vrtložne viskoznosti ovisno o rotaciji kuglastog zatvarača za  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  i  $75^\circ$ . Pretpostavlja se da će u slučaju najmanje otvorenosti zatvarača biti zabilježene najveće vrijednosti, te da će porastom stupnja otvorenosti doći do smanjenja razlike između ekstrema. Za prikaz rezultata odabrana je horizontalno položena ravnina koja prolazi središtem zatvarača, odnosno koordinatama (0,0,0). Slikama 5.38. a-e prikazane su promjene navedene fizikalne veličine.

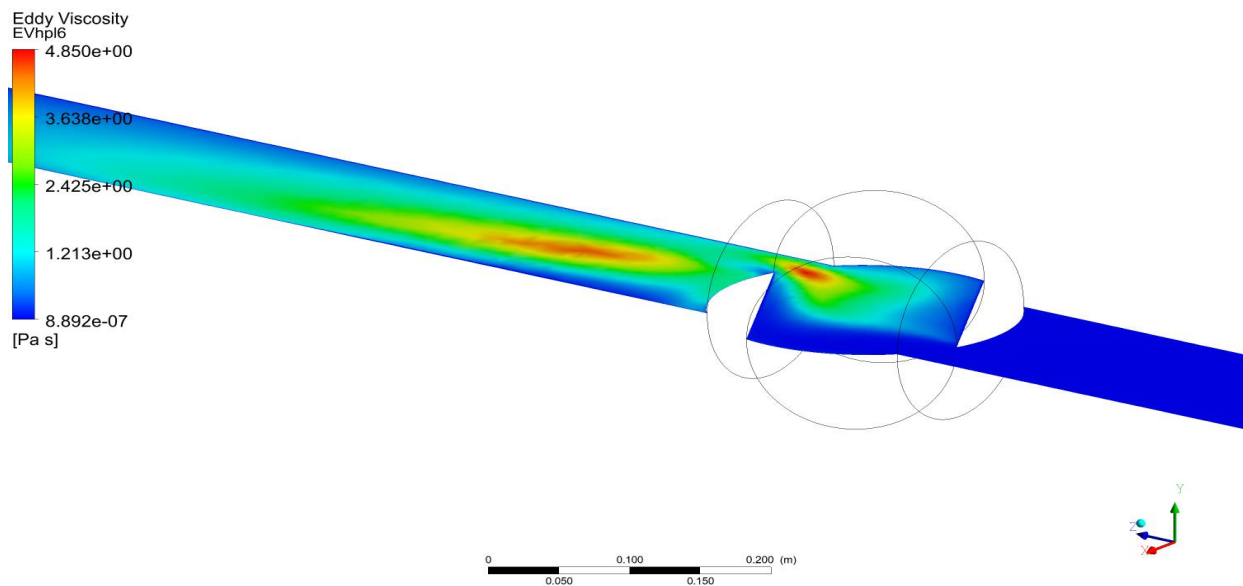
- Rotacija zatvarača za  $15^\circ$  u odnosu na vertikalnu os



a. Promjena vrtložne viskoznosti  $\nu_t$  duž horizontalne ravnine  $\phi$  (kut rotacije  $15^\circ$ )

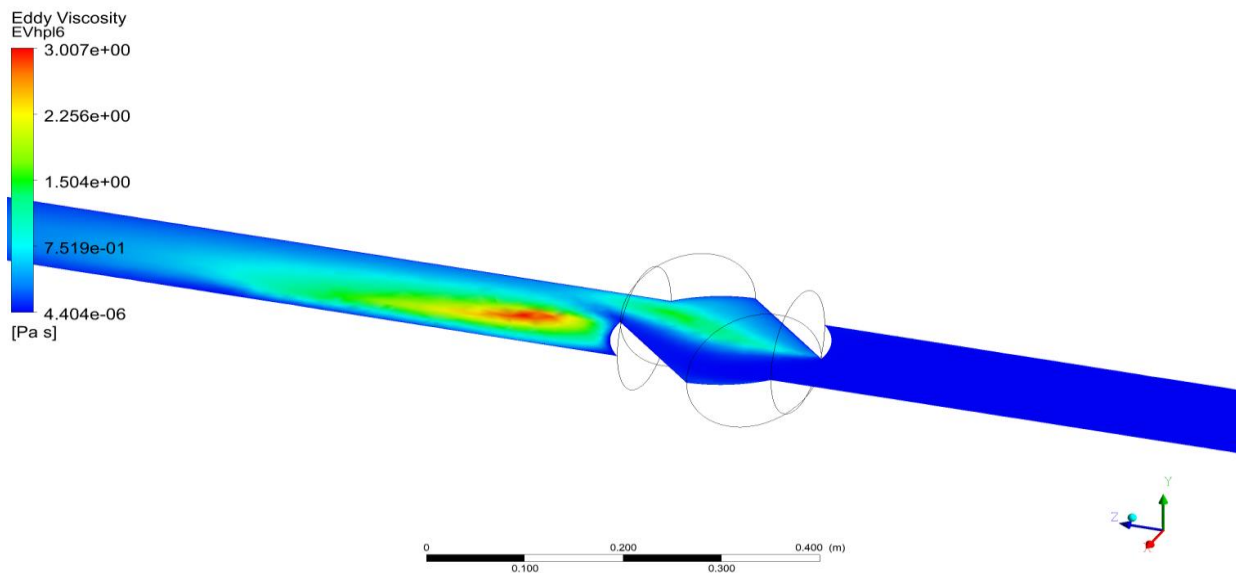
Slika 5.38. a.-e. Promjene vrtložne viskoznosti  $\nu_t$  duž horizontalnih ravnina pri različitim kutovima rotacije u odnosu na vertikalnu os

- Rotacija zatvarača za 30° u odnosu na vertikalnu os



b. Promjena vrtložne viskoznosti  $v_t$  duž horizontalne ravnine 6 (kut rotacije 30°)

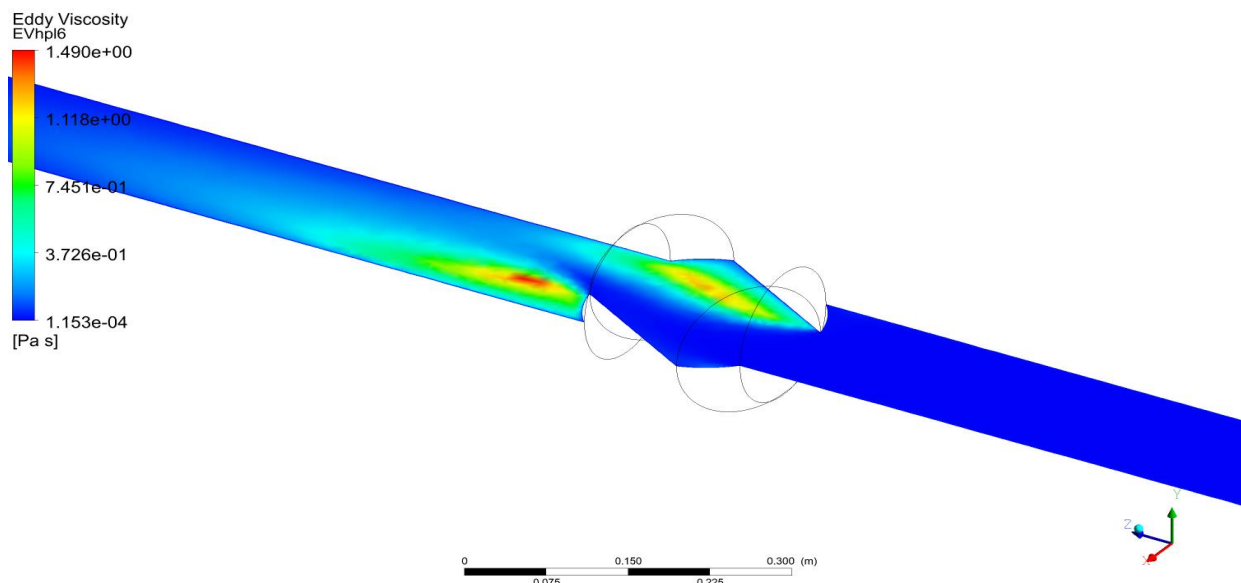
- Rotacija zatvarača za 45° u odnosu na vertikalnu os



c. Promjena vrtložne viskoznosti  $v_t$  duž horizontalne ravnine 6 (kut rotacije 45°)

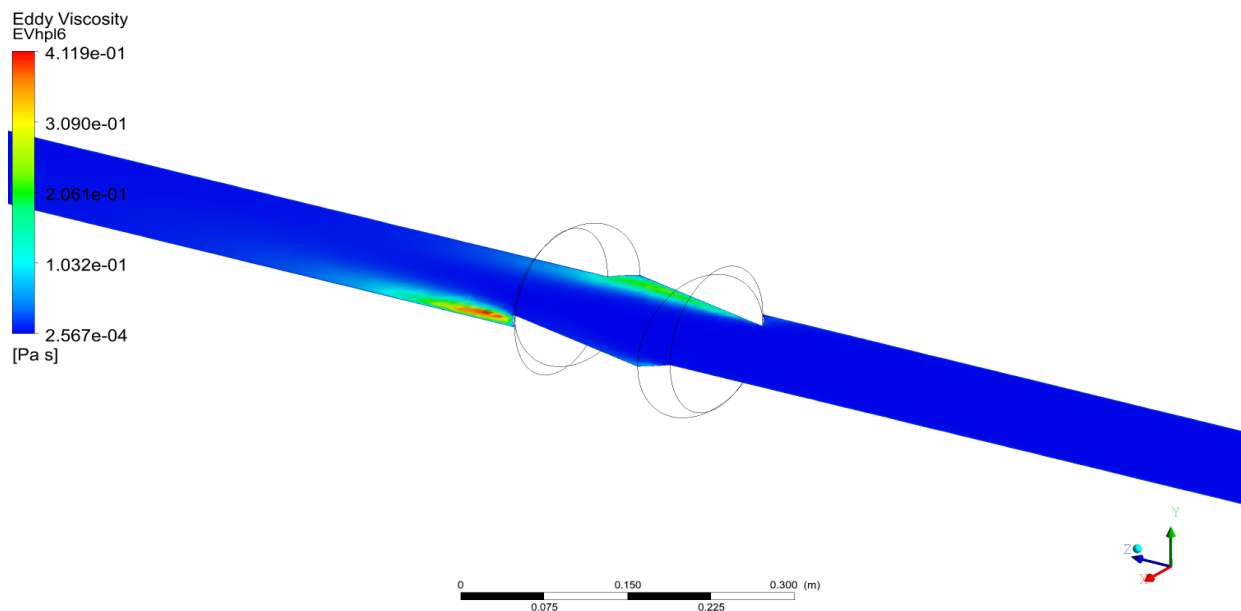
Slika 5.38. a.-e. Promjene vrtložne viskoznosti  $v_t$  duž horizontalnih ravnina pri različitim kutevima rotacije u odnosu na vertikalnu os, nastavak

- Rotacija zatvarača za  $60^\circ$  u odnosu na vertikalnu os



d. Promjena vrtložne viskoznosti  $\nu_t$  duž horizontalne ravnine 6 (kut rotacije  $60^\circ$ )

- Rotacija zatvarača za  $75^\circ$  u odnosu na vertikalnu os



e. Promjena vrtložne viskoznosti  $\nu_t$  duž horizontalne ravnine 6 (kut rotacije  $75^\circ$ )

Slika 5.38. a.-e. Promjene vrtložne viskoznosti  $\nu_t$  duž horizontalnih ravnina pri različitim kutovima rotacije u odnosu na vertikalnu os, nastavak

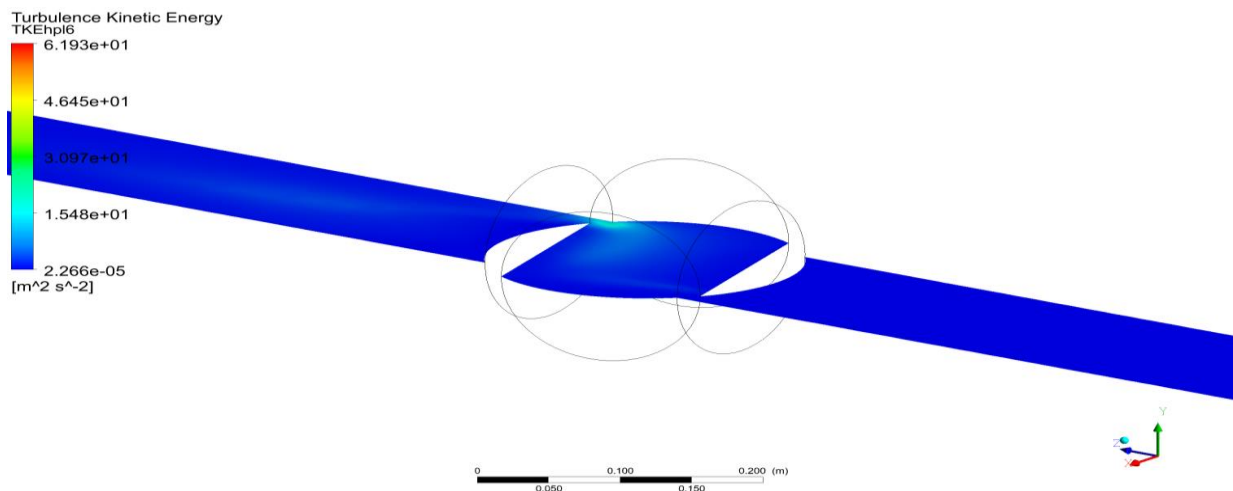


Slikama su prikazane promjene vrtložne viskoznosti u cijevnom sustavu, ovisno o stupnju rotacije kuglastog zatvarača. Rotacijom zatvarača za veći stupanj dolazi do smanjenja razlike između ekstremnih vrijednosti. U prvom slučaju rotacije zatvarača za  $15^\circ$  u odnosu na vertikalnu os najveće vrijednosti su zabilježene u području kuglastog zatvarača. Razlog za to je minimalna otvorenost zatvarača uslijed koje voda, koja dolazi sa maksimalnom brzinom toka i pritiskom, ne može brže protjeci tim dijelom sustava, te dolazi do pojave maksimalne vrtložnosti. Povećanjem stupnja rotacije strujanje fluida u zatvaraču se umiruje i vrtložno strujanje nastaje u području iza kuglastog zatvarača.

#### IV. Kinetička energija turbulencije (*eng. Turbulence Kinetic Energy*)

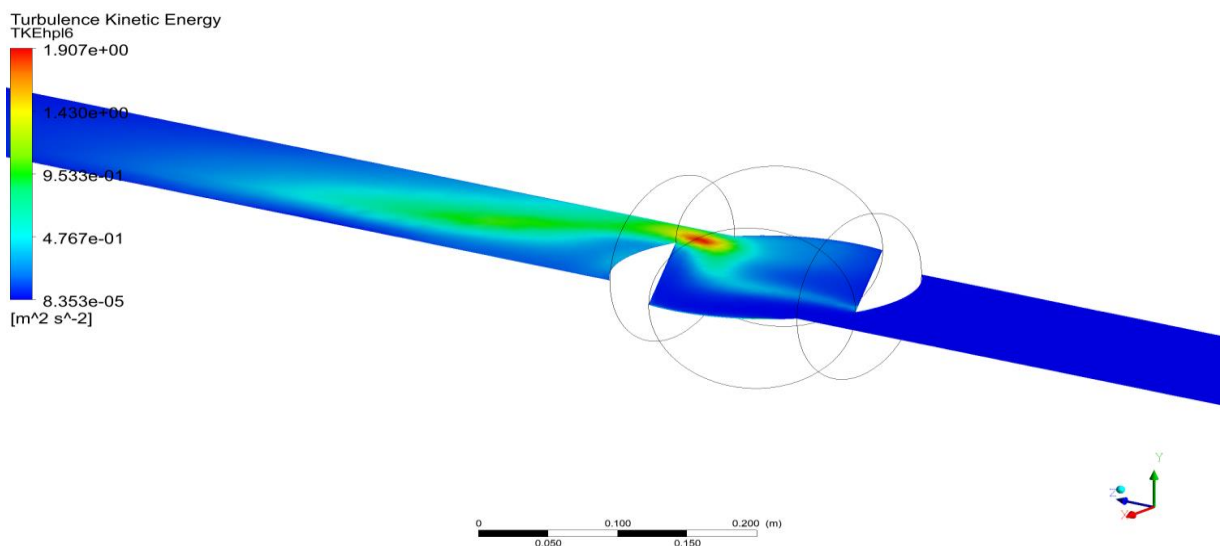
U nastavku su prikazani rezultati vrijednosti kinetičke energije turbulencije ovisno o rotaciji kuglastog zatvarača za  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  i  $75^\circ$ . Pretpostavlja se da će u slučaju najmanje otvorenosti zatvarača biti zabilježene najveće vrijednosti kinetičke energije turbulencije, te da će porastom stupnja otvorenosti doći do smanjenja razlike između ekstremnih vrijednosti. Za prikaz rezultata odabrana je horizontalno položena ravnina koja prolazi središtem zatvarača, odnosno koordinatama  $(0,0,0)$ . Slikama 5.39. a-e prikazane su promjene kinetičke energije turbulencije duž horizontalnih ravnina.

- Rotacija zatvarača za  $15^\circ$  u odnosu na vertikalnu os



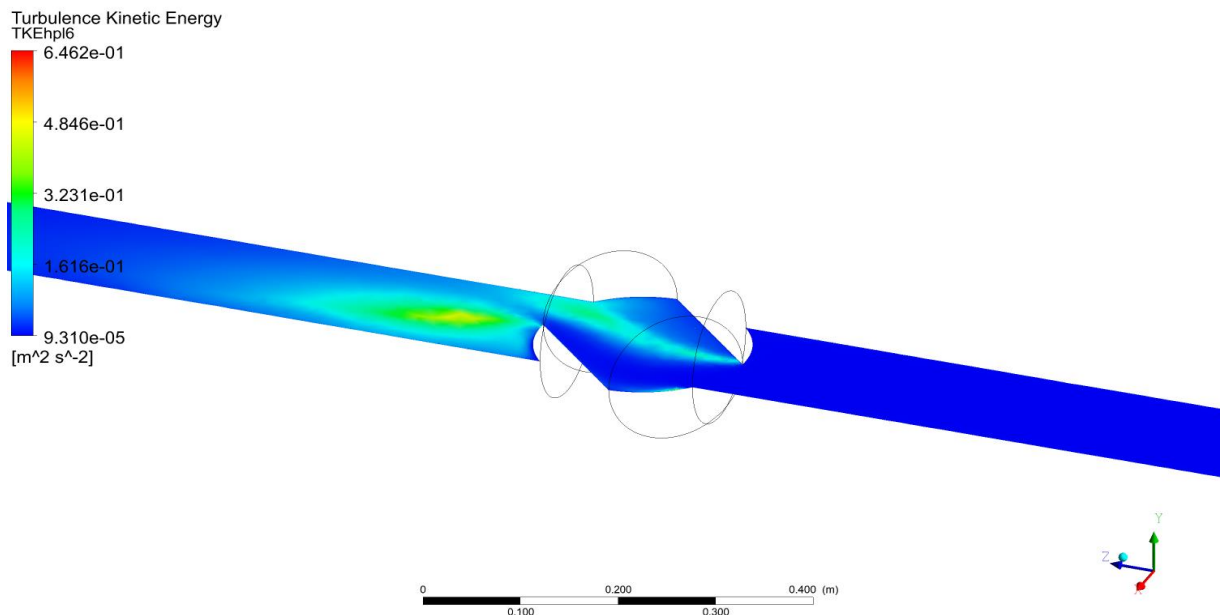
- a. Promjena kinetičke energije turbulencije  $k$  duž horizontalne ravnine  $\phi$  (kut rotacije  $15^\circ$ )  
Slika 5.39. a-e. Promjene kinetičke energije turbulencije  $k$  duž horizontalnih ravnina pri različitim kutovima rotacije u odnosu na vertikalnu os

- Rotacija zatvarača za  $30^\circ$  u odnosu na vertikalnu os



b. Promjena kinetičke energije turbulencije  $k$  duž horizontalne ravnine 6 (kut rotacije  $30^\circ$ )

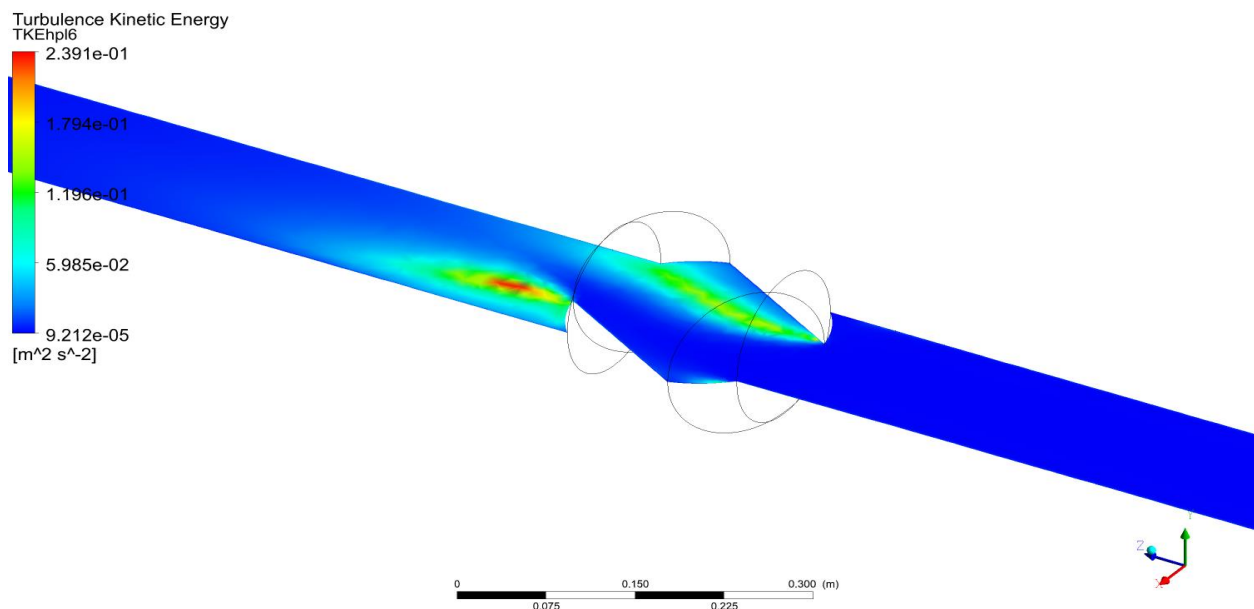
- Rotacija zatvarača za  $45^\circ$  u odnosu na vertikalnu os



c. Promjena kinetičke energije turbulencije  $k$  duž horizontalne ravnine 6 (kut rotacije  $45^\circ$ )

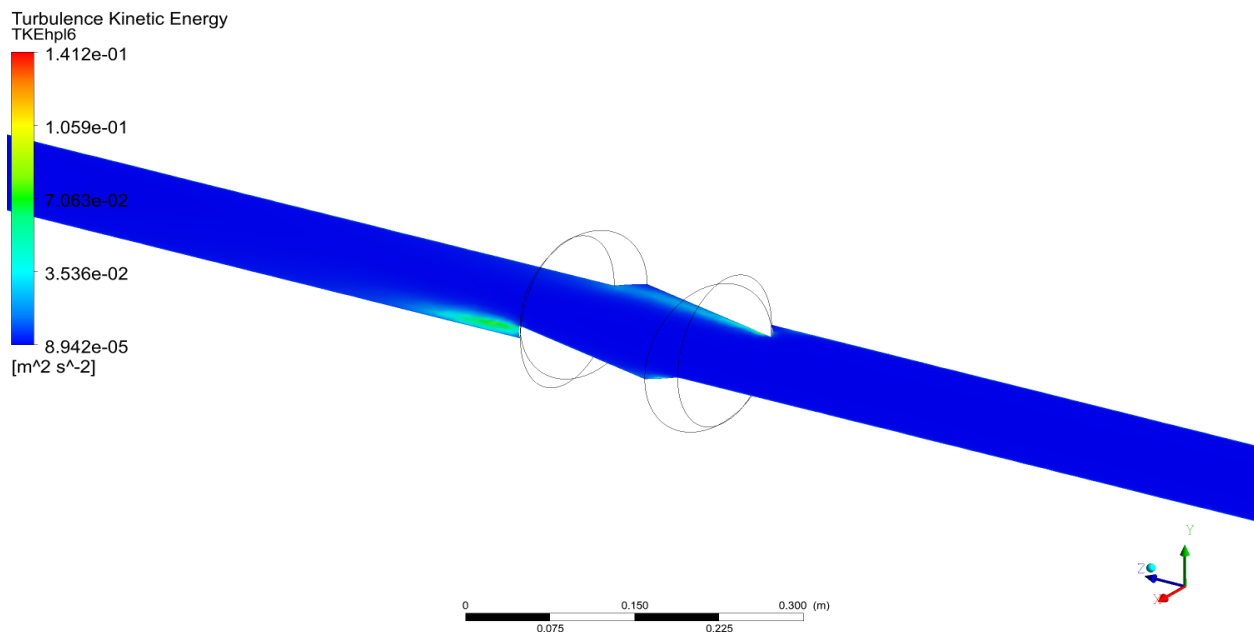
Slika 5.39. a.-e. Promjene kinetičke energije turbulencije  $k$  duž horizontalnih ravnina pri različitim kutevima rotacije u odnosu na vertikalnu os, nastavak

- Rotacija zatvarača za  $60^\circ$  u odnosu na vertikalnu os



d. Promjena kinetičke energije turbulencije  $k$  duž horizontalne ravnine  $\phi$  (kut rotacije  $60^\circ$ )

- Rotacija zatvarača za  $75^\circ$  u odnosu na vertikalnu os



e. Promjena kinetičke energije turbulencije  $k$  duž horizontalne ravnine  $\phi$  (kut rotacije  $75^\circ$ )

Slika 5.39. a.-e. Promjene kinetičke energije turbulencije  $k$  duž horizontalnih ravnina pri različitim kutevima rotacije u odnosu na vertikalnu os, nastavak

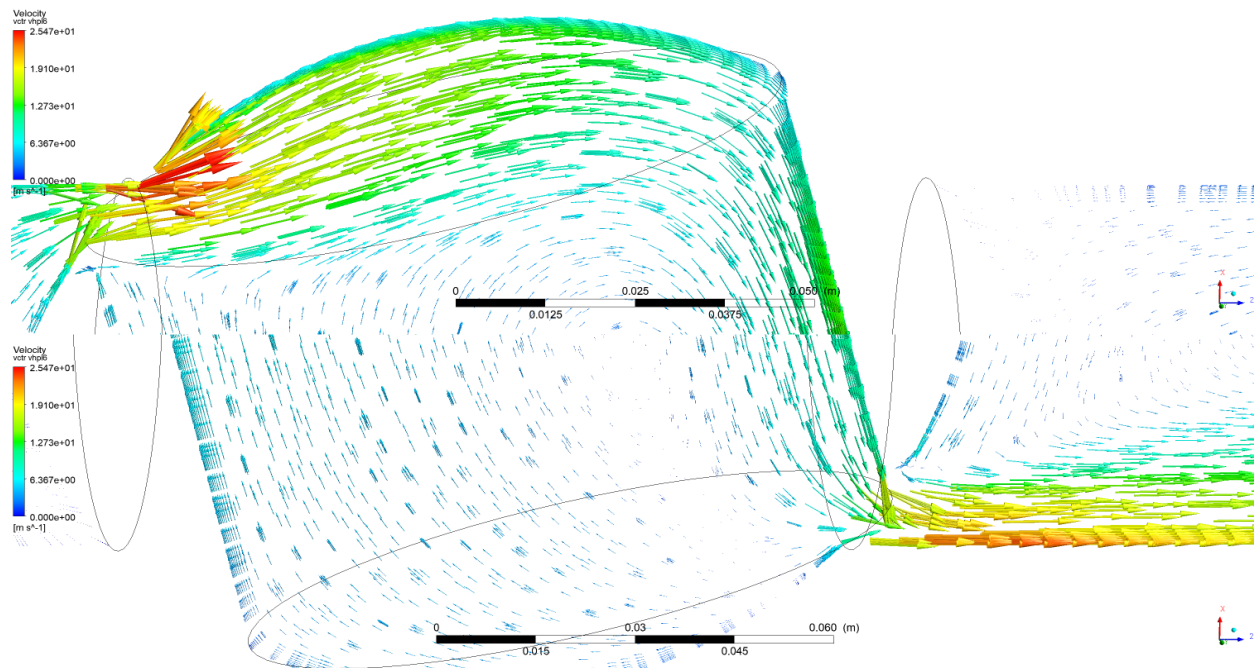
Najmanje vrijednosti općenito u sustavu pojavljuju se za posljednji slučaj, tj. za rotaciju zatvarača od  $75^\circ$ . Porast kinetičke energije zabilježen je tek na manjim dijelovima, točnije iza zatvarača. Promatrajući redom sve slučajeve, moguće je uočiti kako se maksimalne vrijednosti najprije pojavljuju na kontaktu zatvarač-cijev. Daljnjom rotacijom zatvarača područje maksimalnih vrijednosti mijenja svoj položaj, tako da su one na kraju koncentrirane iza zatvarača.

Kao suma na prikazane rezultate pojedinih fizikalnih veličina dano je pojašnjenje za svaku od fizikalnih veličina koje su obuhvaćene slikama, kao i njihove usporedbe.

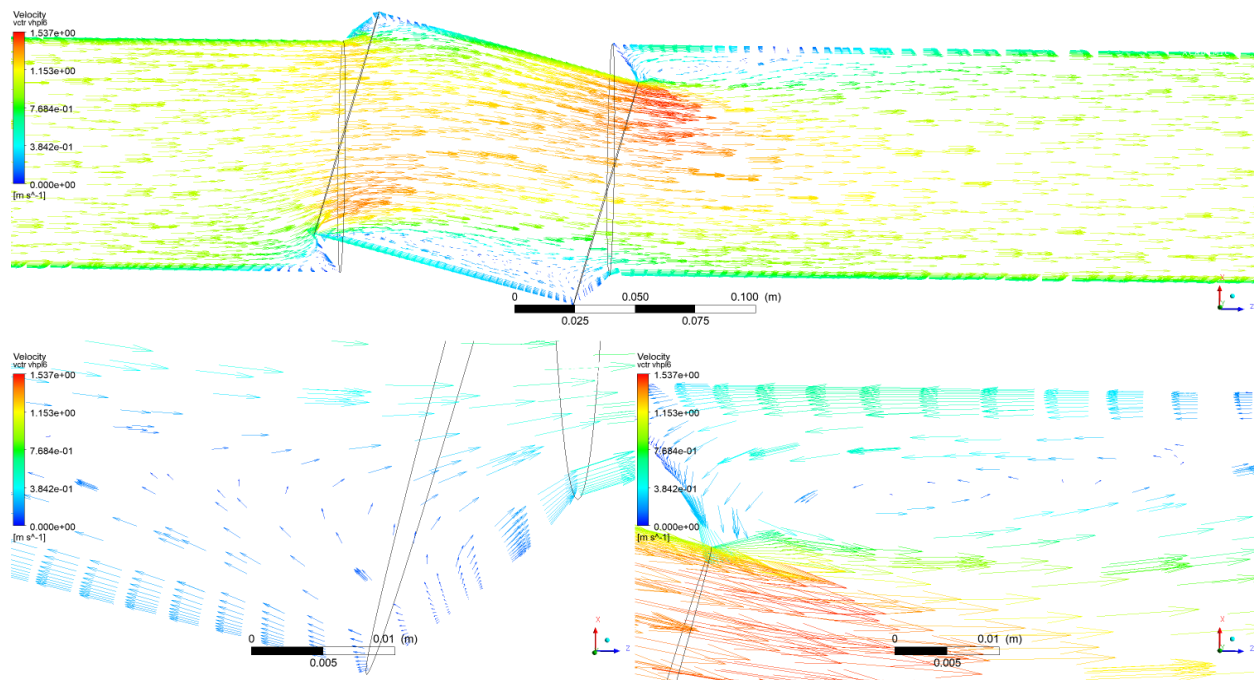
- Brzina toka fluida

Kao i u svim prethodnim primjerima, najveće zabilježene brzine toka su upravo na mjestu strujanja fluida (vode) iz cijevi u zatvarač, te iz zatvarača u cijev. Povećanjem otvorenosti kuglastog zatvarača povećava se površina na kojoj nastaju maksimalne brzine toka, no ne i njezine vrijednosti. U slučaju kada je zatvarač zarotiran za kut od  $15^\circ$ , vrijednost maksimalne brzine toka je najveća od svih varijanti rotacije zatvarača, što je i logično s obzirom da se jednaka količina vode „trudi proći“ kroz poprečni presjek najmanje površine. Prilikom ovakvog stupnja (kuta) rotacije spomenute maksimalne vrijednosti koncentrirane su na vrlo malom dijelu, i to isključivo na području prethodno spomenutih kontakata cijev-zatvarač i zatvarač-cijev (Slika 5.40).

S druge strane, kada je kuglasti zatvarač zakrenut za  $75^\circ$  tok vode je mnogo fluentniji i mirniji. Unutar samoga zatvarača dolazi do razvitka najvećih brzina toka koje se postepeno smanjuju posljedično formirajući tek manje vrtloge na područjima gdje je to i očekivano (Slika 5.41).

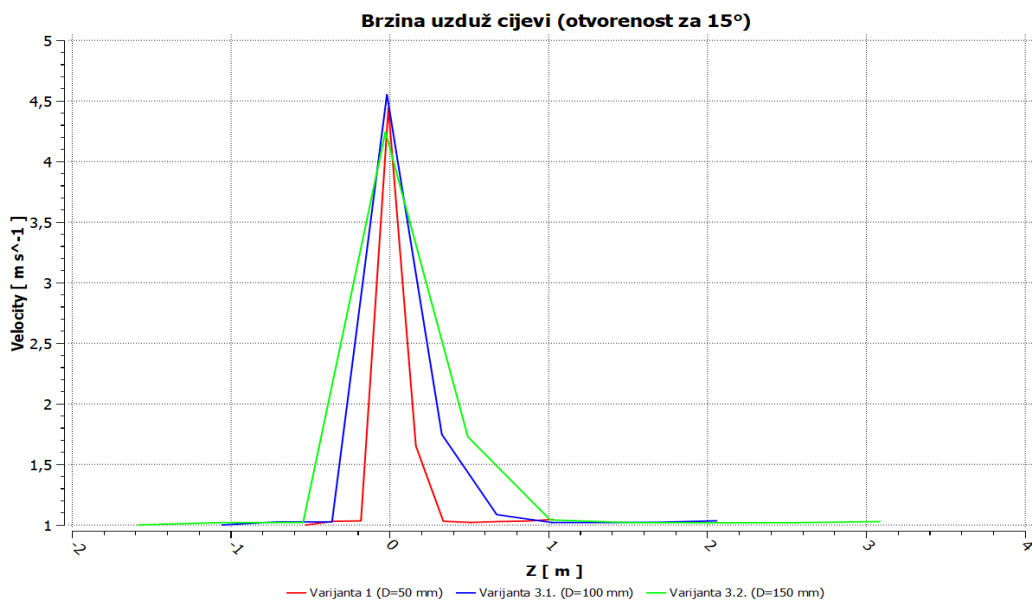


Slika 5.40. Vektorski prikaz područja maksimalnih brzina toka (kut rotacije 15°)

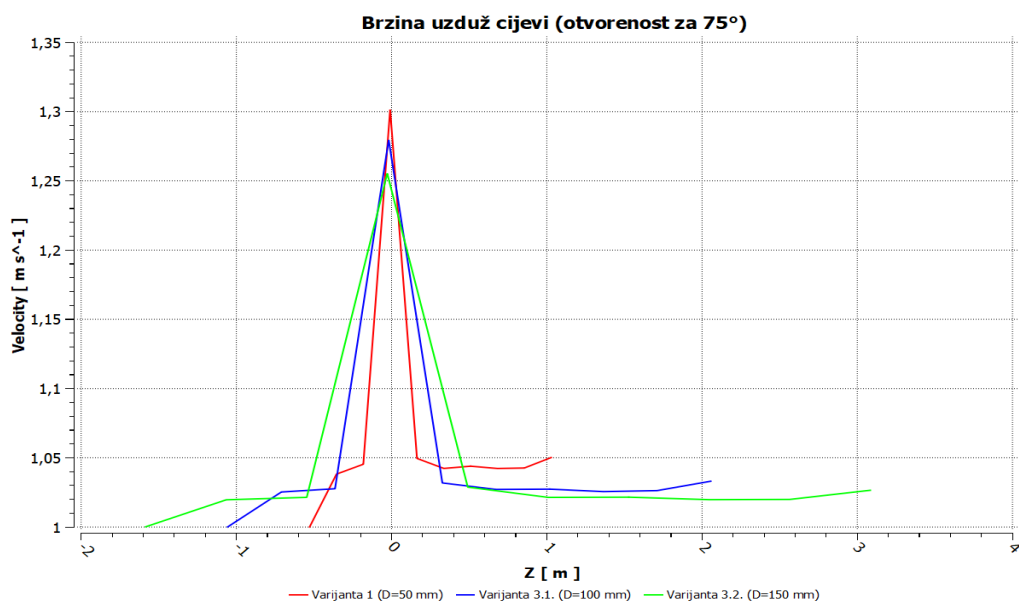


Slika 5.41. Vektorski prikaz promjene brzine toka za rotaciju zatvarača od 75°

Na sljedećim grafičkim prikazima (Slika 5.42.) moguće je uočiti promjenu brzine toka u ovisnosti o otvorenosti zatvarača te promjeru cijevi. Na grafovima su prikazane sveukupno tri varijante koje podrazumijevaju sljedeću geometriju: promjer cijevi od  $D=50$  mm,  $D=100$  mm i  $D=150$  mm.



a. Grafički prikaz promjene brzine toka (kut rotacije zatvarača 15° u odnosu na vertikalnu os)



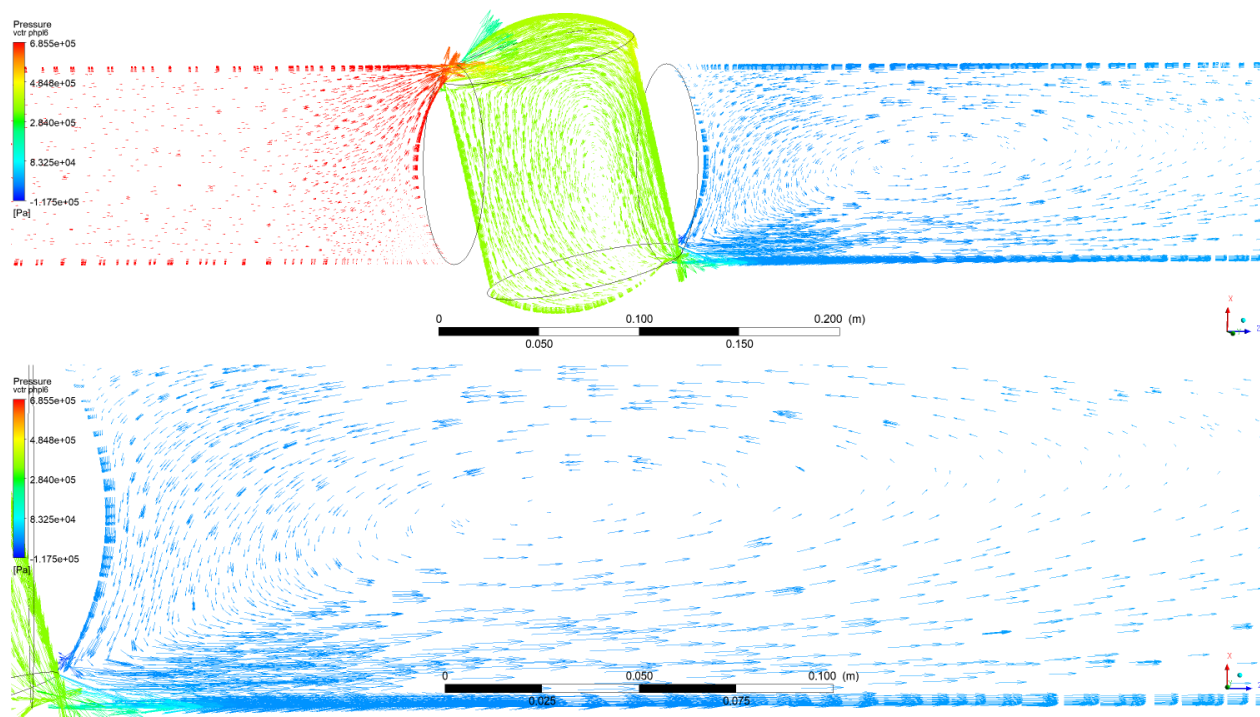
b. Grafički prikaz promjene brzine toka (kut rotacije zatvarača 75° u odnosu na vertikalnu os)

Slika 5.42. Grafički prikaz promjene brzine toka za otvorenost zatvarača od 15° i 75°

Iz grafova se jasno može vidjeti porast brzine toka neposredno ispred kuglastog zatvarača, te simetrično opadanje njezine vrijednosti iza zatvarača. Manji promjer podrazumijeva veće brzine toka u sustavu, kao što to podrazumijeva i manja otvorenost zatvarača, čime se potvrđuju prethodno iznesene tvrdnje. Za sve tri varijante maksimum se postiže u gotovo jednakoj točki, unutar samoga zatvarača, pa se stoga vidi određena podudarnost (proporcionalnost) u promjeni geometrije.

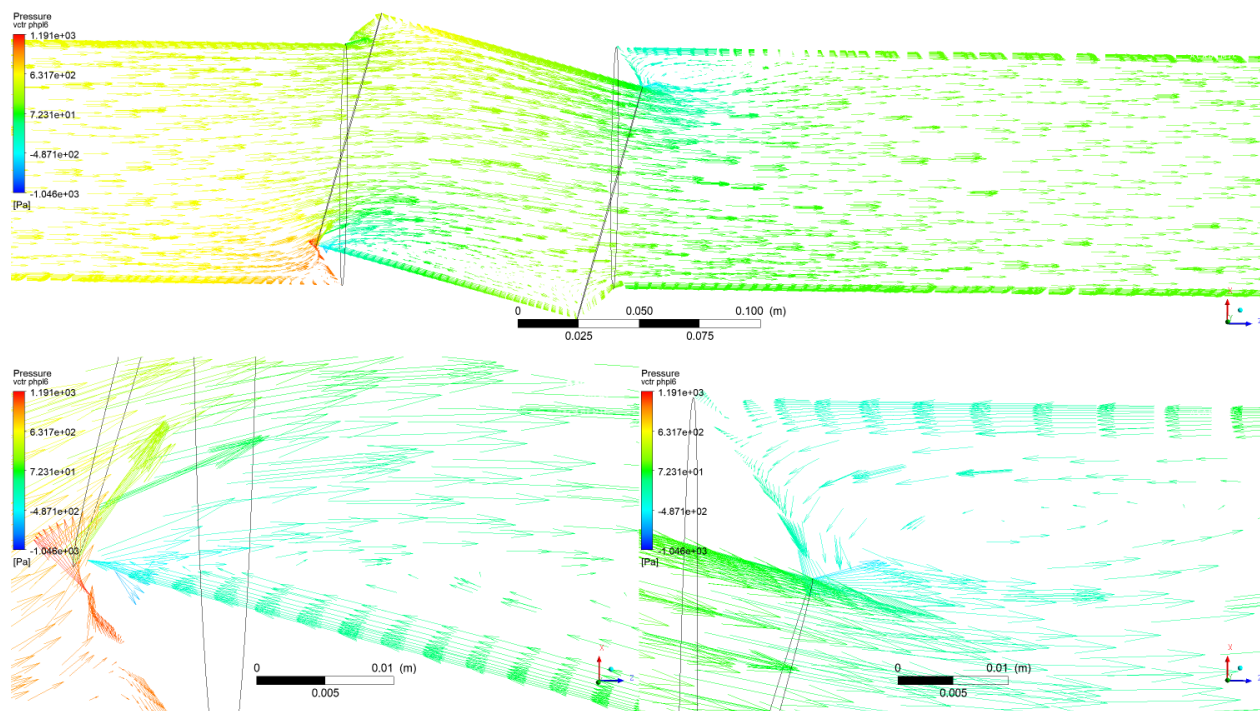
- Tlak

Iz dobivenih rezultata može se zaključiti kako manji stupanj otvorenosti kuglastog zatvarača podrazumijeva veće razlike u tlakovima, te veću mogućnost pojave podtlaka (negativnog manometarskog tlaka) u cijevi. U slučaju minimalne promatrane otvorenosti zatvarača, u prvome dijelu sustava zabilježene su maksimalne vrijednosti relativnog tlaka koje ulaskom u zatvarač podosta opadaju, da bi u drugom dijelu sustava došlo do smanjenja vrijednosti tlaka na minimalne, uz pojavu podtlaka (Slika 5.43.).



Slika 5.43. Vektorski prikaz promjene tlaka pri opstrujavanju vode (kut rotacije 15°)

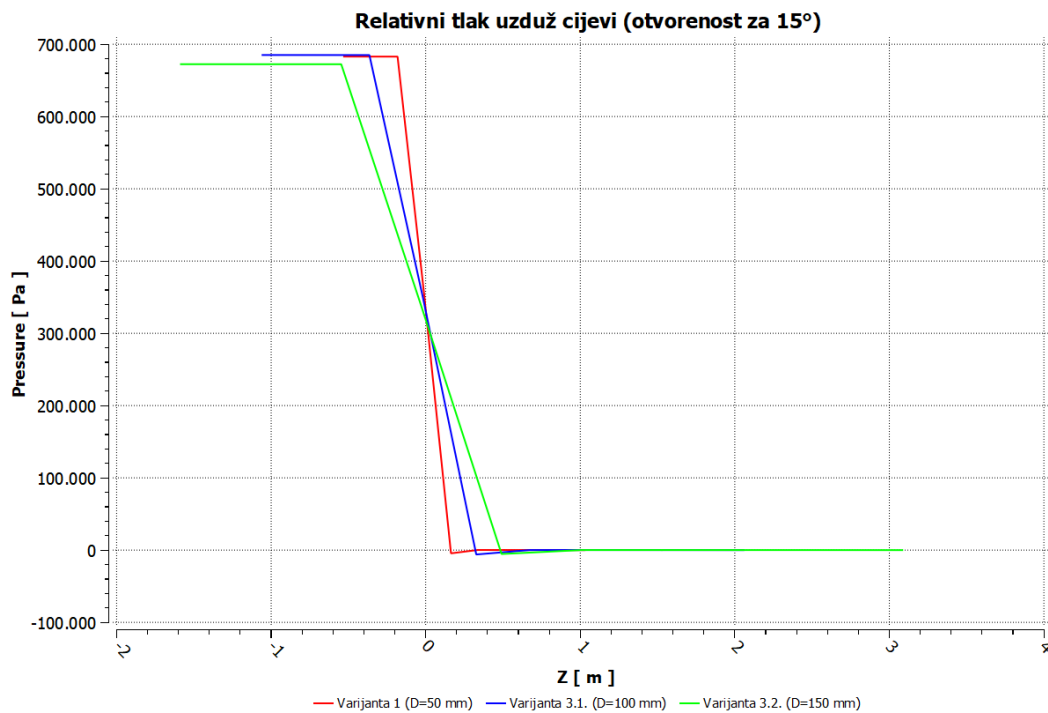
Kao i kod brzine, i ovdje je kod većeg stupnja otvorenosti vidljivo ujednačenje vrijednosti relativnog tlaka što pridonosi boljoj raspodjeli. Manje razlike tlaka uvjetuju manju mogućnost pojave podtlaka i mirniji tok vode kroz cijev (Slika 5.44.).



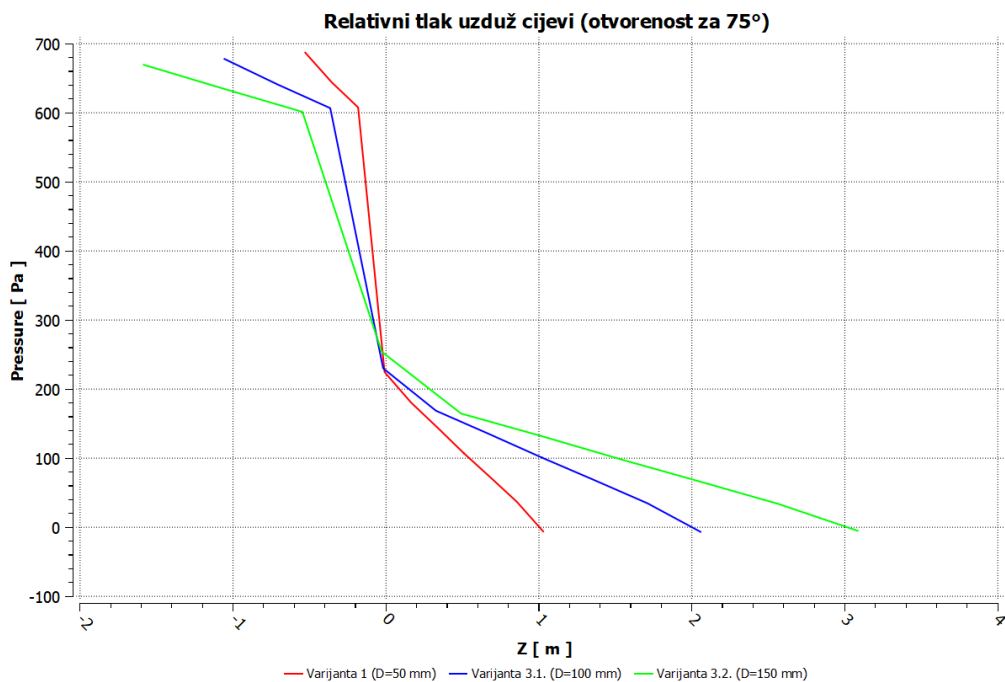
Slika 5.44. Vektorski prikaz promjene tlaka uslijed opstrujavanja vode (kut rotacije 75°)

Sve navedeno dodatno potvrđuju grafički prikazi (Slika 5.45.a-b), gdje se ponovno uspoređuju slučajevi otvorenosti kuglastog zatvarača za 15° i 75° ovisno o promjeni geometrije sustava.





a. Grafički prikaz promjene relativnog tlaka  $p$  (kut rotacije 15°)



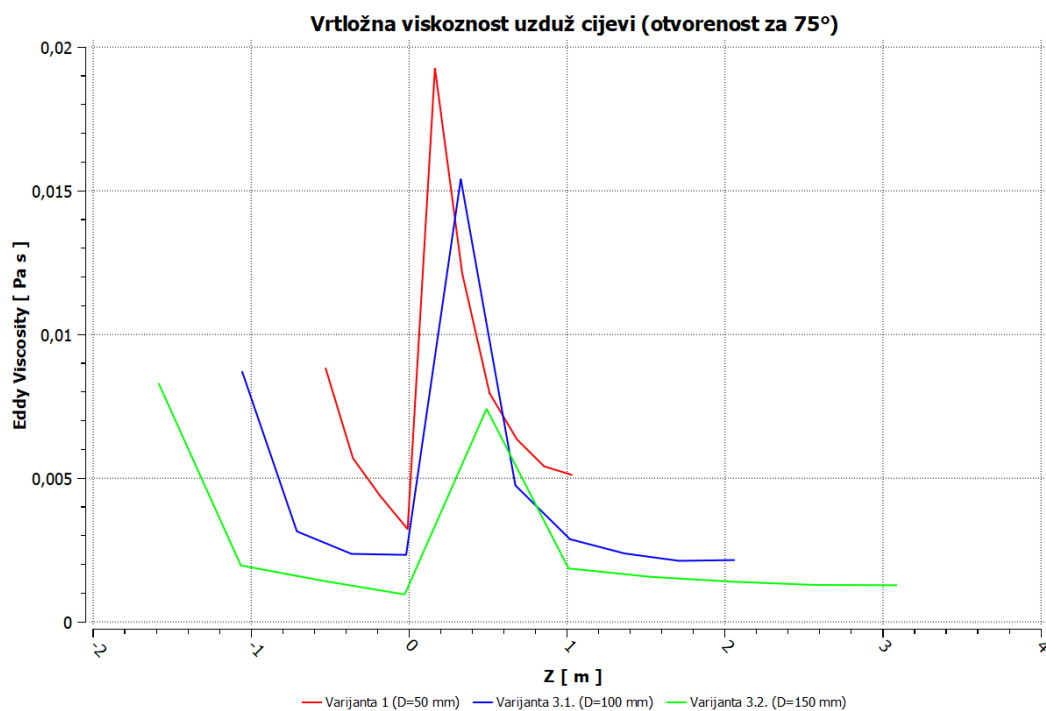
b. Grafički prikaz promjene relativnog tlaka  $p$  (kut rotacije 75°)

Slika 5.45. a.-b. Promjena relativnog tlaka  $p$  u sustavu za tri varijante geometrije cijevnog sustava (otvorenost za 15° i 75°)

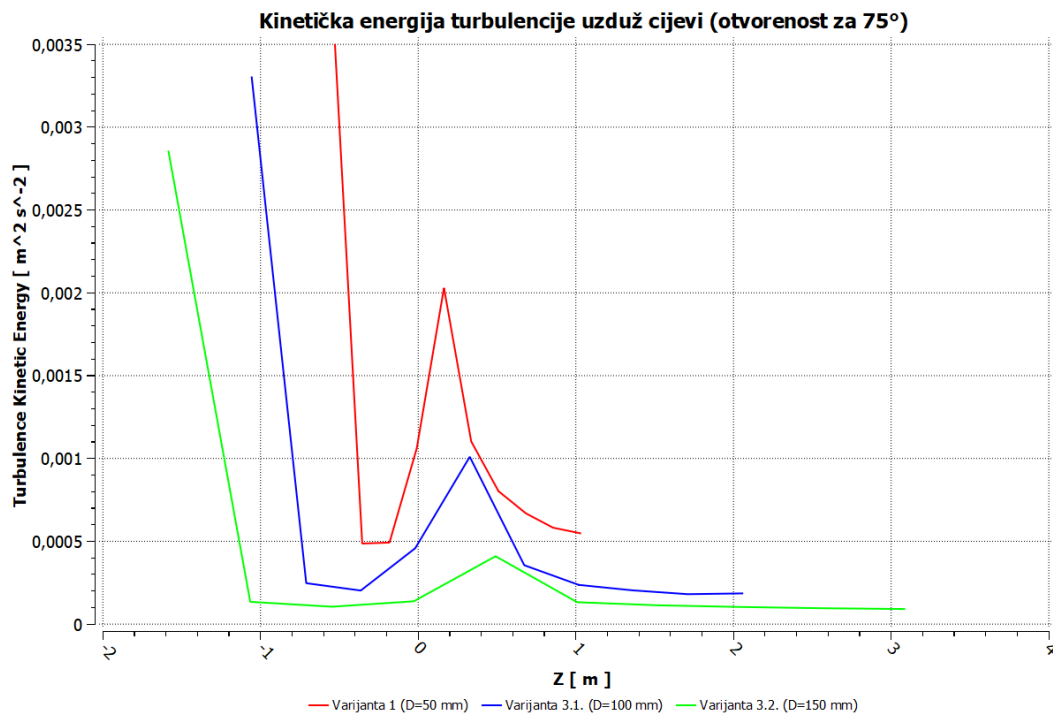
Iz grafova se može vidjeti nagli pad relativnog tlaka do određene vrijednosti, te njegovo stabiliziranje u dijelu sustava nakon kuglastog zatvarača. Na drugoj slici je uočljivo blaže opadanje tlaka sa porastom promjera cijevi, pa je tako zelena linija manjeg nagiba od crvene, koja predstavlja prvu varijantu uz promjer cijevi od  $D=50$  mm.

- Vrtložna viskoznost i kinetička energija turbulencije

Iz sljedeća dva grafa (Slike 5.6. i 5.47.) vidljiva je podudarnost između vrtložne viskoznosti i kinetičke energije turbulencije. Najveća vjerojatnost pojave nestabilnosti je upravo na onim mjestima gdje strujanje vode nije takvo da prati njezin tok. U slučaju zakretanja kuglastog zatvarača za  $75^\circ$  strujanje vode je takvo da poprima određeni linijski tok, no neposredno iza samog zatvarača gdje su brzine strujanja vode najmanje dolazi do pojave nestabilnosti. One su manje što je promjer cijevi veći.



Slika 5.46. Promjena vrtložne viskoznosti  $\nu_t$  u sustavu za tri varijante geometrije cijevnog sustava (kut rotacije  $75^\circ$ )



Slika 5.47. Promjena kinetičke energije turbulencije  $k$  u sustavu za tri varijante geometrije cijevnog sustava (kut rotacije 75°)

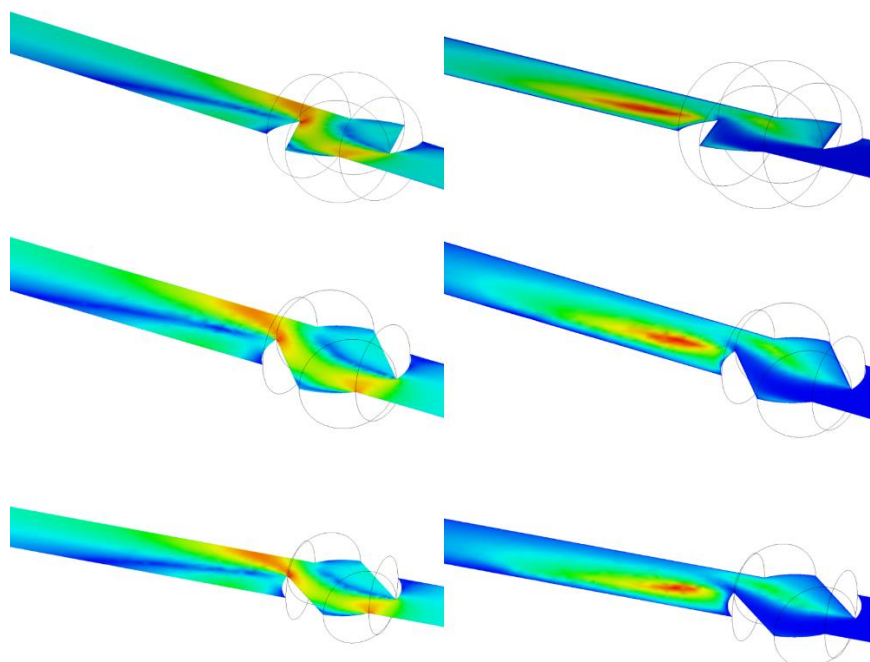
## 6. ZAKLJUČAK

U radu je sprovedena hidraulička analiza za četiri varijante modela. Analizirane su sljedeće fizikalne veličine: brzina toka fluida, relativni i ukupni tlak, vrtložna viskoznost i kinetička energija turbulencije. Na temelju dobivenih vrijednosti dobiveni su određeni zaključci koji će biti pojašnjeni u nastavku. Numerička obrada podataka i analiza je provedena u Ansys CFX 19.1 kompjuterskom programu.

U analizu se krenulo sa određenim pretpostavkama:

- brzine će biti najveće u području kuglastog zatvarača
- povećanjem geometrije smanjiti će se maksimalne vrijednosti brzina toka u sustavu
- povećanjem ulazne brzine toka doći će do povećanja fizikalnih veličina promatranih u ovom radu (uz konstantnu geometriju)
- povećanjem kuta rotacije protok fluida će biti više uravnotežen
- vrlo vjerojatno će doći do stvaranja vrtloga u sustavu.

Provedbom numeričke analize dobiveni su rezultati koji potvrđuju gore navedene pretpostavke, što je najbolje promotriti na slici 6.1.



Slika 6.1. Promjena brzine toka i vrtložne viskoznosti ovisno o promjeni geometrije cijevnog sustava (Varijante 1, 3.1 i 3.2)

Na lijevoj strani su prikazane promjene brzine toka, a na desnoj promjene vrtložne viskoznosti u ovisnosti o promjeni geometrije cijevnog sustava. Gledajući od gore prema dolje, prvi red predstavlja geometriju cijevnog sustava sa promjerom cijevi  $D=50$  mm (Varijanta 1), drugi red geometriju cijevnog sustava sa promjerom cijevi  $D=100$  mm (Varijanta 3.1), a treći red geometriju cijevnog sustava sa promjerom  $D=150$  mm (Varijanta 3.2). Kuglasti zatvarač je zaokrenut za  $45^\circ$ , dok je ulazna brzina toka konstantna i iznosi  $v_{ul}=1$  m/s.

Što se brzine toka tiče moguće je vidjeti kako je za prvu varijantu područje maksimalnih vrijednosti koncentrirano isključivo na kontaktu zatvarač-cijev. Povećanjem promjera cijevi navedeno područje se povećava, što bi značilo da tok postaje ujednačeniji. Manje oscilacije u vrijednostima znače rjeđe pojave vrtloga (turbulencija).

S desne strane moguće je zaključiti sličnu stvar. U slučaju prve varijante maksimalne vrijednosti vrtložne viskoznosti su koncentrirane na određenom području iza dijela kuglastog zatvarača gdje je strujanje fluida najmanjeg intenziteta u usporedbi sa ostatkom sustava. Povećanjem geometrije cijevnog sustava navedeno područje se smanjuje jer tok, kao i u gornjem slučaju, postaje uravnoteženiji.

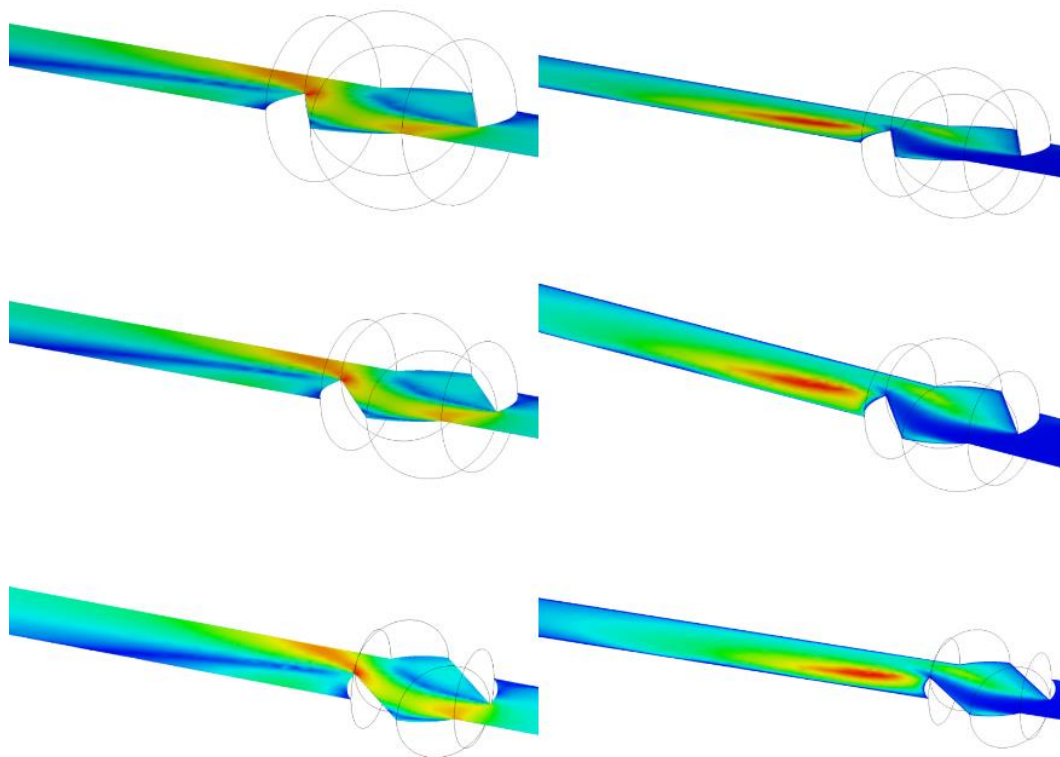
Navedene fizikalne veličine je moguće usporediti i prikazom njihovih maksimalnih vrijednosti (Tablica 6.1).

Tablica 6.1. Vrijednosti brzine toka i vrtložne viskoznosti ovisno o promjeni geometrije cijevnog sustava

Promjer cijevi $D$ [mm]	Brzina toka $v$ [m/s]	Vrtložna viskoznost $\nu_t$ [Pa·s]
50	3,967	1,258
100	3,944	2,100
150	3,845	3,007

Iz tablice se može vidjeti kako povećanjem geometrije cijevnog sustava maksimalne vrijednosti brzine toka u sustavu rastu, dok kod vrtložne viskoznosti opadaju. To je i logično, budući da je viskoznost veličina kojom se izražava otpornost tečenja fluida.

Slika 6.2 prikazuje promjenu brzine toka i vrtložne viskoznosti za drugu provedenu varijantu. Promatra se što će se dogoditi sa vrijednostima fizikalnih veličina ukoliko dođe do povećanja ulazne brzine toka  $v_{ul}$ .



Slika 6.2. Promjena brzine toka i vrtložne viskoznosti ovisno o promjeni ulazne brzine toka (Varijanta 2)

Lijeva strana prikazuje promjenu brzine toka  $v$ , a desna promjenu vrtložne viskoznosti  $v_t$  ovisno o promjeni ulazne brzine toka  $v_{ul}$ . Varijanta 2 podrazumijeva rotaciju kuglastog zatvarača za  $45^\circ$ , a ulazna brzina toka iznosi 1,2, 1,6 i 2,0 m/s (gledajući odozgo prema dolje). Radi lakšeg razumijevanja maksimalne vrijednosti obje fizikalne veličine za navedene slučajeve prikazane su tablicom 6.2:

Tablica 6.2. Vrijednosti brzine toka i vrtložne viskoznosti ovisno o promjeni ulazne brzine toka

Ulazna brzina toka $v_{ul}$ [m/s]	Brzina toka $v$ [m/s]	Vrtložna viskoznost $v_t$ [Pa·s]
1,2	4,756	1,493
1,6	6,356	1,917
2,0	7,944	2,430

Uspoređujući slike i podatke iz tablice, svakako se može potvrditi porast brzine toka u sustavu proporcionalno sa porastom ulazne brzine.

Provedena hidraulička analiza dokazala je povezanost između određenih fizikalnih veličina, na temelju koje je moguće predvidjeti područje pojave vrtloga. Analizirani model nije složene geometrije, stoga je bilo jednostavno pretpostaviti rezultate. Upravo zbog jednostavnosti može biti dobra podloga za daljnja istraživanja uz određene modifikacije u vidu geometrije ili ulaznih parametara. Ukoliko se želi analizirati striktno kuglaste zatvarače, postoje njihove brojne podjele i tipovi zahvaljujući kojima je to moguće. Budući da kuglasti zatvarač sa „V“ otvorom nalazi sve veću primjenu, bilo bi vrlo zanimljivo hidraulički/hidrodinamički analizirati takav tip zatvarača, jer bi zasigurno dao podosta različite rezultate u odnosu na tip zatvarača koji se promatrao u ovom radu. Promjenom vrste fluida ili vrijednosti temperature u sustavu također se dobivaju potpuno novi slučajevi, koji bi nalazili primjenu u određenim industrijama i njihovim proizvodnim procesima. Za sve potencijalne modele i njihove varijante moguće je sprovesti hidrauličke analize u Ansys CFX 19.1 kompjuterskom programu, čija primjena kroz računalno modeliranje postavlja jednu novu razinu u Mehanici fluida.

## 7. LITERATURA

- [1] Žic, E., *Armatura i fazonski komadi (fazoni)*, Predavanja iz kolegija Vodoopskrba i kondicioniranje voda, (8. predavanje), Građevinski fakultet Rijeka, Rijeka, Rijeka, 2019.
- [2] <http://hrv.falcrumconstruction.com/sharovye-ventili-dlja-vody.html> , pristup 3.08.2019.
- [3] [www.miv.hr](http://www.miv.hr) , pristup 3.08.2019.
- [4] [www.grabcad.com](http://www.grabcad.com) , pristup 16.03.2019.
- [5] <https://hrv.lawrenceconstructionsite.com/vodoprovodnye-kranj-sharovye.php> , pristup 4.08.2019.
- [6] [www.constructionmechanical-engineering.blogspot.com](http://www.constructionmechanical-engineering.blogspot.com) , pristup 4.08.2019.
- [7] [www.vis-trgovina.hr](http://www.vis-trgovina.hr) , pristup 9.08.2019.
- [8] [www.indiamart.com](http://www.indiamart.com) , pristup 11.08.2019.
- [9] O. Aikhuele, Daniel, *Ball Valves, Issues and Material Selections for Manufacturing* , pristup 28.07.2019.
- [10] [www.haitima.com.tw](http://www.haitima.com.tw) , pristup 11.08.2019.
- [11] [www.abais.co.uk](http://www.abais.co.uk) , pristup 11.08.2019.
- [12] [www.hydravalve.co.uk](http://www.hydravalve.co.uk) , pristup 14.08.2019.
- [13] <https://hrv.subhaconstruction.com/kran-sharovyj-hto-jeto.php> , pristup 14.08.2019.
- [14] [www.hennlich.hr](http://www.hennlich.hr) , pristup 20.08.2019.
- [15] [www.realpars.com](http://www.realpars.com) ; pristup 23.08.2019.
- [16] Zuo Wangda: *Introduction of Computational Fluid Dynamics*, FAU Erlangen-Nurnberg, JASS 05, St. Petersburg, pristup 25.07.2019.
- [17] [http://www.cham.co.uk/phoenics/d\\_polis/d\\_info/cfdintro.htm](http://www.cham.co.uk/phoenics/d_polis/d_info/cfdintro.htm) ; pristup 15.04.2019.
- [18] [https://www.cfd-online.com/Wiki/Introduction\\_to\\_CFD](https://www.cfd-online.com/Wiki/Introduction_to_CFD) ; pristup 15.04.2019.



Aleksandra Daić, Hidraulička analiza kuglastih zatvarača primjenom Računalne dinamike fluida, Diplomski rad

[19] <https://www.ozeninc.com/products/fluid-dynamics/ansys-cfx/>, pristup 12.08.2019.

[20] Korade, I.: *Izračun otpora krovne kutije montirane na osobni automobil*, Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2009.

[21] Bilas, B.: *Laminarno i tubulentno strujanje tekućina*, Seminarski rad, Čakovec, 2013.

[22] Išek, I.: *Proračun snage vjetro-turbine*, Diplomski rad, Fakultet Strojarsva i Brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2015.

[23] Pacak, M.: *Analiza pada tlaka kroz burobrane napravljene iz profila različitih poprečnih presjeka*, Diplomski rad, Fakultet Strojarsva i Brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2008.

[24] Bukurov, M., Bikić, S., Tašin, S., Žic, E.: *The Third Summer School of Computational Fluid Dynamics*, skripta predavanja, Fakultet Tehničkih Nauka u Novom Sadu, Novi Sad, srpanj 2019.

[25] [http://www.zemris.fer.hr/predmeti/rg/diplomski/06Stargel/mat\\_modeli.html](http://www.zemris.fer.hr/predmeti/rg/diplomski/06Stargel/mat_modeli.html), pristup 23.08.2019.

[26] ANSYS CFX 15.0 Tutorials, priručnik, ANSYS, Inc. Southpointe, Canonsburg, 2013.

[27] [www.flowserve.com](http://www.flowserve.com), pristup 3.09.2019.

[28] Žic, E., Ožanić, N., Karleuša, B., *Skripta zadataka iz kolegija „Hidromehanika“ sa teoretskim osnovama, (1. Opći pojmovi fluida)*, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka, 2010.