

Hidraulička analiza pločastih i leptirastih zatvarača primjenom računalne dinamike fluida

Banko, Patrik

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:157:478160>

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**

Patrik Banko

**HIDRAULIČKA ANALIZA PLOČASTIH I LEPTIRASTIH ZATVARAČA
PRIMJENOM RAČUNALNE DINAMIKE FLUIDA**

Diplomski rad

Rijeka, 2019.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

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

**Patrik Banko
JMBAG: 0114025404**

**HIDRAULIČKA ANALIZA PLOČASTIH I LEPTIRASTIH ZATVARAČA
PRIMJENOM RAČUNALNE DINAMIKE FLUIDA**

Diplomski rad

Rijeka, rujan 2019.

IZJAVA

Diplomski rad izradio 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.

Patrik Banko

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 se mentoru Doc.dr.sc. Elvisu Žic na dostupnosti, ukazanom povjerenju i potpori pri izadi ovog diplomskog rada.

Posebne zahvale postdoktorandu dr.sc. Luki Lešniku sa Strojarskog fakulteta Sveučilišta u Mariboru na pomoći pri izradi geometrija modela korištenih u radu.

Velike zahvale profesoru Andreasu Frohneru sa „University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna“ za pomaganje rješavanja svih problema koji su se pojavili tijekom rada u Ansysovom programskom paketu tijekom boravka u Beču u sklopu CEEPUS mobilnosti u razdoblju od 1. travnja do 31. svibnja 2019. godine.

Također, zahvaljujem se profesorima Siniši Bikiću, Edinu Berberoviću i profesorici Maši Bukurov koji su u Beču bili dio radionice po imenu „Building Knowledge and Experience Exchange in CFD (CIII-RS-1012-04-1819)“ i na taj način prenijeli dio svog znanja na mene.

Veliko hvala mojoj obitelji na potpori tokom studiranja, pogotovo roditeljima, Hvala Vam.

Zahvaljujem se prijateljima i kolegama koji su moje studiranje učinili ljepšim.

SAŽETAK

Zatvarači su kao vrlo bitna komponenta većine vodoopskrbnih sustava izloženi utjecaju velikih hidrodinamičkih sila. Utjecajem velikih vrijednosti pojedinih fizikalnih veličina na zatvarač i cijev u kojem se nalazi može doći do njihovog oštećenja, što može ugroziti funkcioniranje vodoopskrbnog sustava. Upravo je iz tog razloga potrebno predvidjeti i odrediti maksimalne vrijednosti brzina, tlakova i ostalih fizikalnih veličina koje bi se mogle pojaviti u promatranom sustavu pri određenim uvjetima. Predviđanje ekstremnih uvjeta omogućuje pravilno dimenzioniranje zatvarača za očekivane uvjete kojima bi zatvarač mogao biti izložen što je ujedino i glavni cilj ovog rada.

Jedna od metoda predviđanja i određivanja ekstremnih vrijednosti kod zatvarača je modeliranje koristeći Računalnu dinamiku fluida (*eng. Computational Fluid Dynamics*). Upravo je spomenuta metoda korištena pri izradi ovog rada kako bi se dobio uvid u vrijednosti fizikalnih veličina za modele pločastog i leptirastog zatvarača unutar cijevi pri karakterističnim stupnjevima zatvorenosti. Za dobivanje potrebnih rezultata i provedbu hidrodinamičke analize korišten je Ansys Workbench 19.1 računalni programski paket.

Hidrodinamička analiza je provedena za četiri stupnja otvorenosti pločastog i tri stupnja otvorenosti leptirastog zatvarača. Određeno je i pojašnjeno na kojim se pozicijama unutar cijevi javljaju ekstremne vrijednosti koje mogu oštetiti zatvarač. Za obrađene modele dobiveni rezultati ukazuju kako se najopasniji uvjeti tečenja javljaju pri manjim stupnjevima otvorenosti zatvarača. Usporedbom modela s različitim položajima otvorenosti zatvarača i različitim rubnim uvjetima utvrđene su veze temeljem kojih je moguće predvidjeti ekstremne vrijednosti pojedinih fizikalnih veličina za ostale stupnjeve otvorenosti zatvarača i za drukčije rubne uvjete. Definirani su položaji pojavljivanja maksimalnih vrijednosti svih fizikalnih veličina, kavitacije i podtlakova. Ustanovljeno je kako su vrijednosti pojedinih fizikalnih veličina višestruko veće u području zatvarača u usporedbi s njihovim vrijednostima na ulaznim/izlaznim profilima cijevi.

Zaključak je kako je modeliranje koristeći Računalnu dinamiku fluida relativno brz i efikasan način dobivanja potrebnih informacija i podataka prije kretanja u samo projektiranje i dimenzioniranje elemenata cjevovoda i komponenti vodoopskrbnih sustava.

Ključne riječi: pločasti zatvarač, leptirasti zatvarač, numeričko modeliranje, hidraulička analiza, Računalna dinamika fluida, Ansys CFX

ABSTRACT

As a very important element of most water supply systems, valves are exposed to impacts of strong hydrodynamic forces. Being subjected to large physical quantities may result in valve and pipe being damaged, which could endanger the performance of a water supply system. That is the main reason why it is necessary to foresee and determine the maximum values of velocity, pressure and other physical quantities which could occur in the system being observed under certain conditions. Foreseeing extreme conditions allows us proper valve dimensioning for expected conditions that valve could be exposed to, which is also the main goal of this paper.

One of the methods to forecast and determine extreme values at a valve is to make a simulation using Computational Fluid Dynamics (CFD). This is exactly the method used upon production of this paper, with a goal of getting insight of physical quantity values for models of gate and butterfly valves positioned inside a pipe under characteristic degrees of valve closure. Ansys Workbench 19.1 computer program package was used to simulate hydrodynamic analysis and get the necessary results.

Hydrodynamic analysis was performed for four degrees of gate valve openings and three degrees of butterfly valve openings. The positions of extreme values inside the pipe which could endanger the valve are defined and explained. Obtained results for processed models show us that the most hazardous flow conditions occur at valves with smaller openness degree. By comparing different valve models with various openness positions and different boundary conditions relations between models were defined. These relations can be used to foresee extreme values of certain physical quantities for other positions of valve openness and different boundary conditions. The positions of maximum values of all physical quantities, cavitation and vacuum were defined as well. It is determined that values of some physical quantities in valve are multiple times larger compared to their values on inlet/outlet pipe profiles.

It is concluded that numerical modeling using Computational Fluid Dynamics (*CFD*) is a relatively fast and effective way to collect necessary information and data before planning, designing and dimensioning pipe and water supply system elements.

Key Words: gate valve, butterfly valve, numerical modeling, hydraulic analysis, Computational fluid dynamics, Ansys CFX

SADRŽAJ

POPIS SLIKA

POPIS TABLICA

1. UVOD.....	19
2. OSNOVNE ZNAČAJKE ZATVARAČA	22
2.1. Pločasti zatvarači.....	22
2.1.1. Svrha i značajke pločastih zatvarača	22
2.1.2. Opis rada pločastih (tablastih) zatvarača	24
2.1.3. Tipovi pločastih zatvarača u vodoopskrbnim sustavima	25
2.1.4. Dimenzije i karakteristike pločastih zatvarača	29
2.2. Leptirasti zatvarači	31
2.2.1. Svrha i značajke leptirastih zatvarača	31
2.2.2. Opis rada leptirastih zatvarača	35
2.2.3. Tipovi leptirastih zatvarača u vodoopskrbnim sustavima	35
2.2.4. Dimenzije i karakteristike leptirastih zatvarača	38
2.3. Načini mjerenja brzina, protoka i tlakova kod leptirastih i pločastih zatvarača	39
2.3.1. Mjerenje brzina fluida u cijevima s leptirastim i pločastim zatvaračima	39
2.3.2. Mjerenje protoka u cijevima s leptirastim i pločastim zatvaračima	43
2.4. Ispitivanje vodonepropusnosti zatvarača.....	47
3. PRIMJENA ANSYS PROGRAMSKOG PAKETA	49
3.1. Općenito o Ansys programskom paketu i tvrtki	49
3.2. Računalna dinamika fluida (<i>eng. CFD</i>)	51
3.3. Studentska verzija ANSYS Workbench programskog paketa.....	53
3.4. Ansysov programski paket i njegova primjena.....	57
4. NUMERIČKI MODELI ZA HIDRAULIČKU ANALIZU OPSTRUJAVANJA FLUIDA OKO TABLASTIH I LEPTIRASTIH ZATVARAČA	62
4.1. Izrada modela i generiranje objekata vodoopskrbnog sustava	62
4.1.1. Izrada modela pločastog zatvarača i generiranje objekata vodoopskrbnog sustava	62
4.1.2. Izrada modela leptirastog zatvarača i generiranje objekata vodoopskrbnog sustava	64
4.2. Predprocesiranje.....	65
4.3. Definiranje fizikalnih parametara u numeričkom modelu.....	68
4.4. Postprocesiranje i analiza podataka	73
4.5. Podmodeli pločastih zatvarača.....	74

4.6. Podmodeli leptirastih zatvarača	75
5. HIDRODINAMIČKA ANALIZA I REZULTATI ISTRAŽIVANJA	77
5.1. Rezultati ispitivanja pločastih zatvarača	77
5.1.1. Brzina toka fluida	77
5.1.2. Relativni tlak	85
5.1.3. Totalni tlak	90
5.1.4. Dinamička viskoznost	96
5.1.5. Vrtložna viskoznost	97
5.1.6. Kinetička energija turbulencije.....	101
5.1.7. Mjera deformacije smicanjem	105
5.1.8. Brzine toka u smjerovima u, v i w.....	108
5.2. Rezultati ispitivanja leptirastih zatvarača	112
5.2.1. Brzina toka fluida	112
5.2.2. Relativni tlak	121
5.2.3. Totalni tlak	126
5.2.4. Dinamička viskoznost	132
5.2.5. Vrtložna viskoznost	133
5.2.6. Kinetička energija turbulencije.....	136
5.2.7. Mjera deformacije smicanjem	140
5.2.8. Brzine toka u smjerovima u, v i w.....	143
5.2.9. Usporedba masenih protoka	147
6. ZAKLJUČAK	149
7. LITERATURA	152

POPIS SLIKA

Slika 1. Presjek pločastog zatvarača [2]	23
Slika 2. Postupak podizanja pločastog zatvarača [5]	24
Slika 3. Pločasti zatvarač s krutim klinom [2]	25
Slika 4. Pločasti zatvarač s fleksibilnim klinom [2]	26
Slika 5. Pločasti zatvarač s razdjelnim klinom [2]	27
Slika 6. Vrste pločastih zatvarača ovisno o vezi tijela i poklopca [2]	27
Slika 7. Tip zatvarača s podižućom drškom (modificirano prema [2])	28
Slika 8. Tip zatvarača s nepodižućom drškom (modificirano prema [2])	29
Slika 9. Pločasti zatvarač s elastičnim ležištem u duktilnom željezu [6]	30
Slika 10. Dijelovi leptirastog zatvarača [9]	32
Slika 11. Leptirasti zatvarači s horizontalnom osovinom, kut zatvaranja 90° i 80° [4]	33
Slika 12. Leptirasti zatvarač s vertikalnom osovinom promjera 2800 mm [11]	34
Slika 13. Detaljan prikaz dijelova leptirastog zatvarača (modificirano prema [12])	34
Slika 14. Zatvoreni i otvoreni leptirasti zatvarač s horizontalnom osovinom (modificirano prema [13])	35
Slika 15. Podjela leptirastih zatvarača ovisno o tipu završetka tijela [14]	35
Slika 16. Bočno zavareni leptirasti zatvarač [15]	36
Slika 17. Leptirasti zatvarač s električnim pokretačem [14]	37
Slika 18. Leptirasti zatvarači bez i sa pomakom (modificirano prema [8])	37
Slika 19. Međuflašni leptirasti zatvarač u lijevanom čeliku [16]	38
Slika 20. Venturijeva cijev [17]	40
Slika 21. Pitotova cijev (modificirano prema [19])	41
Slika 22. Anemometar s vrućom žicom [20]	41
Slika 23. Aksijalni turbinski mjerač brzine [22]	42
Slika 24. Radijalni turbinski mjerač brzine [21]	42
Slika 25. Rotametar [24]	44
Slika 26. Elektromagnetski mjerač protoka [25]	44
Slika 27. Ultrazvučni mjerač protoka [26]	45
Slika 28. Coriolisov princip mjerenja masenog protoka [27]	46
Slika 29. Tehnički dodatak za AVK pločaste zatvarače [28]	46
Slika 30. Prvi korak ispitivanja vodonepropusnosti [29]	47
Slika 31. Drugi korak ispitivanja vodonepropusnosti (modificirano prema [29])	47
Slika 32. Treći korak ispitivanja vodonepropusnosti (modificirano prema [29])	48
Slika 33. Tvrtke koje koriste Ansys platformu [33]	50

Slika 34. Globalno sjedište tvrtke Ansys u Canonsburgu [34]	51
Slika 35. Pregled modeliranja u Računalnoj dinamici fluida [33]	52
Slika 36. Izrada mreže elemenata kod Računalne dinamike fluida [33]	53
Slika 37. Radno sučelje ANSYS Workbench 19.1 programskog paketa.....	54
Slika 38. Radno sučelje DesignModeler programa	56
Slika 39. Radno sučelje CFX-Mesh programa.....	56
Slika 40. Radno sučelje programa Gambit [36]	58
Slika 41. Predviđanje opstrujavanja zraka (lijevo) i opterećenja fluidom (desno) za Formulu 1 [33]	59
Slika 42. Simulacija učinkovitosti propelera primjenom Ansys računalnih programa [33].....	60
Slika 43. Simulacija velikih valova na konstrukciju platforme daleko od obale [33].....	60
Slika 44. 2D i 3D prikaz pločastog zatvarača i cijevi izrađenih u Autocadu 2016 i DesignModeler programu	63
Slika 45. Završna 3D geometrija 20% zatvorenog pločastog zatvarača unutar SpaceClaim programa	64
Slika 46. Završni 3D geometrijski model 30° otvorenog leptirastog zatvarača u DesignModeler programu	65
Slika 47. Numerička mreža dobivena za pločasti zatvarač s 20% zatvorenosti	67
Slika 48. Provjera asimetričnosti za numeričku mrežu pločastog zatvarača s 20% otvorenosti	67
Slika 49. Mreža elemenata dobivena za leptirasti zatvarač s otvorenosti od 30°	68
Slika 50. Definiranje fizikalnih parametara na numeričkom modelu u CFX kompjuterskom programu	69
Slika 51. Prikaz modela cijevi i zatvarača unutar Ansys CFX-predprocesorskog dijela.....	70
Slika 52. Prikaz strujnica u Ansysovom CFX-postprocesorskom dijelu programa	73
Slika 53. Poprečni profili varijabilnosti brzina kod numeričkog modela s pločastim zatvaračem	74
Slika 54. Modeli pločastog zatvarača s različitim stupnjem zatvorenosti.....	75
Slika 55. Modeli leptirastog zatvarača s različitim stupnjem otvorenosti.....	76
Slika 56. Prikaz modela pločastih zatvarača sa strujnicama.....	78
Slika 57. Raspored poprečnih profila kod pločastih modela u odnosu na dispoziciju zatvarača	80
Slika 58. Poprečni profil brzine toka na pločastom zatvaraču s 20 % zatvorenosti.....	80
Slika 59. Grafički prikaz vrijednosti maksimalnih brzina toka za pločasti model s 80 % zatvorenosti na temelju poprečnih profila	82
Slika 60. Prikaz položaja uzdužnih profila kod modela pločastog zatvarača	82
Slika 61. Središnji uzdužni profili brzina toka za 80 % otvorenosti zatvarača.....	83

Slika 62. Grafički prikaz vrijednosti maksimalnih brzina toka za pločasti model s 80 % zatvorenosti zatvarača na temelju uzdužnih profila	85
Slika 63. Sučelje postprocesiranja s profilom relativnih tlakova na pločastom zatvaraču za podmodel s 80 % zatvorenosti zatvarača i ulaznom brzinom od 1,5 m/s.....	87
Slika 64. Raspodjela relativnih tlakova na poprečnim profilima podmodela pločastog zatvarača s 80 % zatvorenosti i ulaznom brzinom od 1 m/s.....	87
Slika 65. Raspodjela relativnih tlakova na središnjim uzdužnim profilima za podmodel s 80 % zatvorenosti.....	89
Slika 66. Grafičko pojašnjenje totalnog tlaka (modificirano prema [42]).....	90
Slika 67. Sučelje postprocesiranja s profilom totalnih tlakova na pločastom zatvaraču za podmodel s 80 % zatvorenosti i ulaznom brzinom od 1,5 m/s	92
Slika 68. Raspodjela totalnih tlakova na poprečnim profilima podmodela pločastog zatvarača s 80 % zatvorenosti i ulaznom brzinom od 1 m/s	93
Slika 69. Raspodjela totalnih tlakova na središnjim uzdužnim profilima za podmodel pločastog zatvarača s 80 % zatvorenosti	95
Slika 70. Varijabilnost dinamičke viskoznosti duž numeričkog modela pločastog zatvarača ..	96
Slika 71. Raspodjela vrtložne viskoznosti na poprečnim profilima podmodela pločastog zatvarača s 80 % zatvorenosti i ulaznom brzinom toka od 1,5 m/s	98
Slika 72. Raspodjela vrtložne viskoznosti na središnjim uzdužnim profilima za podmodel s 80 % zatvorenosti.....	100
Slika 73. Raspodjela kinetičke energije turbulencije na poprečnim profilima podmodela pločastog zatvarača s 80 % zatvorenosti i ulaznom brzinom toka od 1,5 m/s.....	102
Slika 74. Raspodjela kinetičke energije turbulencije na središnjim uzdužnim profilima za podmodel s 80 % zatvorenosti pločastog zatvarača	104
Slika 75. Raspodjela mjera posmičnih naprezanja na poprečnim profilima podmodela pločastog zatvarača s 80 % zatvorenosti i ulaznom brzinom toka od 1,5 m/s.....	106
Slika 76. Raspodjela mjere posmičnog naprezanja na središnjim uzdužnim profilima za podmodel pločastog zatvarača s 80 % zatvorenosti	107
Slika 77. Prikaz strujnicama za brzinu toka uzduž vodoopskrbne cijevi	108
Slika 78. Raspodjela brzina u smjeru osi y (brzina v) na poprečnim profilima podmodela pločastog zatvarača s 80 % zatvorenosti i ulaznom brzinom toka od 1,5 m/s.....	110
Slika 79. Raspodjela brzina toka u smjeru osi y (brzina v) na središnjim uzdužnim profilima za podmodel pločastog zatvarača s 80 % zatvorenosti.....	111
Slika 80. Prikaz modela leptirastih zatvarača sa strujnicama	113
Slika 81. Raspored poprečnih profila kod leptirastih modela u odnosu na dispoziciju zatvarača	115
Slika 82. Poprečni profil brzine toka na leptirastom zatvaraču s 30° otvorenosti	115
Slika 83. Grafički prikaz vrijednosti maksimalnih brzina toka za leptirasti model s 30° otvorenosti zatvarača na temelju poprečnih profila	117

Slika 84. Prikaz položaja uzdužnih profila kod modela leptirastog zatvarača	118
Slika 85. Drugi uzdužni profili brzina toka za 30° otvorenosti leptirastog zatvarača	119
Slika 86. Grafički prikaz vrijednosti maksimalnih brzina toka za leptirasti model s 30° otvorenosti zatvarača na temelju uzdužnih profila	121
Slika 87. Sučelje postprocesiranja s profilom relativnih tlakova na leptirastom zatvaraču za podmodel s 30° otvorenosti zatvarača i ulaznom brzinom od 1,5 m/s	123
Slika 88. Raspodjela relativnih tlakova na poprečnim profilima podmodela leptirastog zatvarača s 30° otvorenosti i ulaznom brzinom od 1 m/s	124
Slika 89. Raspodjela relativnih tlakova na središnjim uzdužnim profilima za podmodel s 30° otvorenosti	126
Slika 90. Sučelje postprocesiranja s profilom totalnih tlakova na leptirastom zatvaraču za podmodel s 30° otvorenosti i ulaznom brzinom od 1,5 m/s	128
Slika 91. Raspodjela totalnih tlakova na poprečnim profilima podmodela leptirastog zatvarača s 30° otvorenosti i ulaznom brzinom toka od 1 m/s	129
Slika 92. Raspodjela totalnih tlakova na središnjim uzdužnim profilima za podmodel leptirastog zatvarača s 30° otvorenosti	131
Slika 93. Varijabilnost dinamičke viskoznosti duž numeričkog modela leptirastog zatvarača	132
Slika 94. Raspodjela vrtložne viskoznosti na poprečnim profilima podmodela leptirastog zatvarača s 30° otvorenosti i ulaznom brzinom toka od 1,5 m/s	134
Slika 95. Raspodjela vrtložne viskoznosti na središnjim uzdužnim profilima za podmodel s 30° otvorenosti	136
Slika 96. Raspodjela kinetičke energije turbulencije na poprečnim profilima podmodela leptirastog zatvarača s 30° otvorenosti i ulaznom brzinom toka od 1,5 m/s	138
Slika 97. Raspodjela kinetičke energije turbulencije na središnjim uzdužnim profilima za podmodel s 30° otvorenosti leptirastog zatvarača	140
Slika 98. Raspodjela mjera posmičnih naprezanja na poprečnim profilima podmodela leptirastog zatvarača s 30° otvorenosti i ulaznom brzinom toka od 1,5 m/s	142
Slika 99. Raspodjela mjere posmičnog naprezanja na središnjim uzdužnim profilima za podmodel leptirastog zatvarača s 30° otvorenosti	143
Slika 100. Prikaz strujnicama za brzinu toka uzduž vodoopskrbne cijevi	144
Slika 101. Raspodjela brzina u smjeru osi x (brzina u) na poprečnim profilima podmodela leptirastog zatvarača s 30° otvorenosti i ulaznom brzinom toka od 1,5 m/s	146
Slika 102. Raspodjela brzina toka u smjeru osi x (brzina u) na središnjim uzdužnim profilima za podmodel leptirastog zatvarača s 30° otvorenosti	147
Slika 103. Položaji gornje i donje korisnički definirane plohe kod podmodela leptirastog zatvarača s 30° otvorenosti	148

POPIS TABLICA

Tablica 1. Dimenzije pločastog zatvarača proizvođača Valvotubi [6].....	31
Tablica 2. Dimenzije leptirastog zatvarača proizvođača Valvotubi [16]	39
Tablica 3. Odabir modela turbulencije u Ansys Fluent i Ansys CFX kompjuterskim programima [33].....	70
Tablica 4. Ponašanje i uporaba RANS modela turbulencije u Ansys Fluent i Ansys CFX kompjuterskim programima [33]	72
Tablica 5. Prikaz maksimalnih, minimalnih i srednjih vrijednosti brzine toka za svaki od modela pločastog zatvarača	79
Tablica 6. Prikaz maksimalnih i srednjih vrijednosti brzina toka na pločastom zatvaraču kod mjerodavnih poprečnih profila	80
Tablica 7. Prikaz maksimalnih i srednjih vrijednosti brzina toka na pločastom zatvaraču kod mjerodavnih uzdužnih profila	84
Tablica 8. Prikaz maksimalnih, minimalnih i srednjih vrijednosti relativnih tlakova za svaki od modela pločastog zatvarača.....	86
Tablica 9. Prikaz vrijednosti maksimalnih, minimalnih i srednjih relativnih tlakova na poprečnim profilima kod modela pločastog zatvarača	88
Tablica 10. Prikaz maksimalnih, minimalnih i srednjih vrijednosti totalnih tlakova za svaki od modela pločastih zatvarača	91
Tablica 11. Prikaz vrijednosti maksimalnih, minimalnih i srednjih totalnih tlakova na poprečnim profilima kod modela pločastog zatvarača	94
Tablica 12. Prikaz maksimalnih, minimalnih i srednjih vrijednosti vrtložne viskoznosti za svaki od numeričkih modela pločastog zatvarača	97
Tablica 13. Prikaz vrijednost maksimalnih, minimalnih i srednjih vrijednost vrtložne viskoznosti na poprečnim profilima modela pločastog zatvarača.....	99
Tablica 14. Prikaz maksimalnih, minimalnih i srednjih vrijednosti kinetičke energije turbulencije za svaki od numeričkih modela pločastog zatvarača	101
Tablica 15. Prikaz vrijednosti maksimalnih, minimalnih i srednjih vrijednost kinetičke energije turbulencije na poprečnim profilima pločastog zatvarača.....	103
Tablica 16. Prikaz maksimalnih, minimalnih i srednjih vrijednosti mjere deformacije smicanjem za svaki od numeričkih modela pločastog zatvarača	105
Tablica 17. Prikaz maksimalnih, minimalnih i srednjih vrijednosti brzine toka u smjeru osi x (brzina u) za svaki od modela pločastog zatvarača	108
Tablica 18. Prikaz maksimalnih, minimalnih i srednjih vrijednosti brzine toka u smjeru osi y (brzina v) za svaki od modela pločastog zatvarača	109
Tablica 19. Prikaz maksimalnih, minimalnih i srednjih vrijednosti brzine toka u smjeru osi z (brzina w) za svaki od modela pločastog zatvarača	109
Tablica 20. Prikaz maksimalnih, minimalnih i srednjih vrijednosti brzine toka za svaki od modela leptirastog zatvarača.....	114

Tablica 21. Prikaz maksimalnih i srednjih vrijednosti brzina toka na leptirastom zatvaraču kod mjerodavnih poprečnih profila	116
Tablica 22. Prikaz maksimalnih i srednjih vrijednosti brzina toka na leptirastom zatvaraču kod mjerodavnih uzdužnih profila	120
Tablica 23. Prikaz maksimalnih, minimalnih i srednjih vrijednosti relativnih tlakova za svaki od modela leptirastog zatvarača	122
Tablica 24. Prikaz vrijednosti maksimalnih, minimalnih i srednjih relativnih tlakova na poprečnim profilima kod modela leptirastog zatvarača	124
Tablica 25. Prikaz maksimalnih, minimalnih i srednjih vrijednosti totalnih tlakova za svaki od modela leptirastih zatvarača.....	127
Tablica 26. Prikaz vrijednosti maksimalnih, minimalnih i srednjih totalnih tlakova na poprečnim profilima kod modela leptirastog zatvarača	129
Tablica 27. Prikaz maksimalnih, minimalnih i srednjih vrijednosti vrtložne viskoznosti za svaki od numeričkih modela leptirastog zatvarača	133
Tablica 28. Prikaz vrijednost maksimalnih, minimalnih i srednjih vrijednost vrtložne viskoznosti na poprečnim profilima modela leptirastog zatvarača	134
Tablica 29. Prikaz maksimalnih, minimalnih i srednjih vrijednosti kinetičke energije turbulencije za svaki od numeričkih modela leptirastog zatvarača.....	137
Tablica 30. Prikaz vrijednosti maksimalnih, minimalnih i srednjih vrijednost kinematičke energije turbulencije na poprečnim profilima leptirastog zatvarača	138
Tablica 31. Prikaz maksimalnih, minimalnih i srednjih vrijednosti mjere deformacije smicanjem za svaki od numeričkih modela leptirastog zatvarača.....	141
Tablica 32. Prikaz maksimalnih, minimalnih i srednjih vrijednosti brzine toka u smjeru osi x (brzina u) za svaki od modela leptirastog zatvarača.....	144
Tablica 33. Prikaz maksimalnih, minimalnih i srednjih vrijednosti brzine toka u smjeru osi y (brzina v) za svaki od modela leptirastog zatvarača.....	145
Tablica 34. Prikaz maksimalnih, minimalnih i srednjih vrijednosti brzine toka u smjeru osi z (brzina w) za svaki od modela leptirastog zatvarača.....	145
Tablica 35. Maseni protoci na korisnički definiranim plohama	148

1. UVOD

Primarni cilj vodoopskrbe je distribucija vode krajnjim korisnicima. Vodoopskrbna mreža se sastoji od niza međusobno zavisnih elemenata. Jedan od takvih elemenata je i zatvarač koji služi za regulaciju toka fluida. Zatvarač je element vodoopskrbne mreže koji se koristi na raznim dispozicijama unutar mreže. Neke od tih dispozicija su krajevi cijevi kod kojih zatvarač služi za sprječavanje otjecanja vode, spoj vodoopskrbne cijevi i potrošačkog priključka, gdje se regulira ima li potrošač dotok vode, dispozicije gdje je potrebno regulirati količinu vode i smanjiti dotok na određenom dijelu i slično. Zahtjevi količine vode koju je potrebno distribuirati potrošačima nisu jednake, postoje velike razlike zahtjevane količine između pojedinih potrošača, ali i industrija. Naime, većina industrija ne zahtjeva konstantnu dostavu vode, već potrebna količina vode ovisi o samom proizvodnom procesu industrije. Za reguliranje količina distribuirane vode koriste se zatvarači i to je njihova primarna svrha.

U ovom diplomskom radu analizira se protok vode kroz dio cijevi u kojemu se nalaze pločasti (tablasti) i leptirasti zatvarači koji reguliraju tok vode u i iza cijevi. Različiti intenziteti strujanja vode koji ovise o stupnju zatvorenosti spomenutih zatvarača mogu izazvati pojave povećanih brzina vode unutar same cijevi, stvaranje vrtloga, velikih tlakova, podtlakova i sličnih pojava koje uzrokuju oštećenja cijevi i samih zatvarača. Mjerenjem, tj. računanjem vrijednosti brzina toka, relativnih i totalnih tlakova, vrtložne viskoznosti, dinamičke viskoznosti, naprezanja, kinematičke energije turbulencije i ostalih fizikalnih veličina dobiva se uvid o njihove veličine/vrijednosti, a poznavajući maksimalne dozvoljene vrijednosti pojedinih fizikalnih veličina dobiva se i uvid o njihovom potencijalnom štetnom djelovanju. Pravodobnim uočavanjem prekoračenih maksimalnih vrijednosti moguće je sprječiti ili minimalizirati štetni utjecaj djelovanja primjerice prevelikih brzina toka. Cilj ovog rada je koristeći Računalnu dinamiku fluida (*eng. Computational Fluid Dynamics*) dobiti uvid u vrijednosti fizikalnih veličina za modele pločastog i leptirastog zatvarača unutar cijevi pri karakterističnim stupnjevima zatvorenosti. Usporedbom rezultata modela različitih stupnjeva zatvorenosti zatvarača cilj je odrediti maksimalne vrijednosti fizikalnih veličina koje se mogu pojaviti unutar svakog modela/podmodela što u praksi omogućuje proizvođaču precizniju, ekonomičniju i kvalitetniju izradu promatranih komponenti cjevovoda, tj. cijevi i zatvarača. Analiziranjem različitih rubnih uvjeta, (npr. različitih ulaznih brzina toka) moguće je na temelju veza modeliranja pretpostaviti očekivane vrijednosti pojedinih fizikalnih veličina koje se mogu pojaviti za isti model pri drukčijim rubnim uvjetima (npr. veća brzina toka na ulazu u vodoopskrbnu cijev).

Razvitek računalne tehnologije omogućuje provođenje inženjerskih numeričkih simulacija za koje je unutar ovog rada korišten Ansys Workbench 19.1 studentski paket koji ima široku primjenu u raznim tehnološkim granama poput računalne tehnologije, graditeljstva, zrakoplovne industrije i dr. Numerička analiza unutar programa temelji se na Navier-Stokesovim jednadžbama i na metodi konačnih volumena. Proces simulacija se temelji na generiranju numeričke mreže čvorova unutar promatranog sustava. Definiranjem položaja čvorova u svakoj ćeliji koja je definirana kao konačan volumen, te postavljanjem parcijalnih diferencijalnih jednadžbi za svaki čvor dobiva se rješenje koje predstavlja vrijednost pojedine fizikalne veličine u čvoru ćelije.

Rad je formuliran tako da je primarno opisano funkcioniranje i osnovne značajke zatvarača unutar drugog poglavlja. Ono uključuje opis i svrhu njihove uporabe i značajki pločastih i leptirastih zatvarača unutar kojih je opisana njihova konstrukcija i ograničenja uporabe. U nastavku drugog poglavlja pojašnjeni su principi rada spomenutih zatvarača, te je dana podjela tipova pločastih i leptirastih zatvarača u vodoopskrbnim sustava u sklopu čega su opisane i karakteristične dimenzije zatvarača. Opisani su načini mjerenja brzina toka, protoka i tlakova, nakon čega je opisan postupak ispitivanja vodonepropusnosti na primjeru pločastog zatvarača.

Treće poglavlje obuhvaća opis Ansys Workbench programskog paketa, detaljniji uvod u Računalnu dinamiku fluida (*eng. CFD*) i detaljan opis studentske verzije ANSYS Workbench programskog paketa i njenih ograničenja. Osim toga, opisan je cijelokupan Ansysov programski paket i njegova primjena u raznim granama tehnologije.

Unutar četvrtog poglavlja opisana je izrada numeričkog modela i njegovih podmodela za pločaste i leptiraste zatvarače, njihove varijante i generiranje objekata unutar vodoopskrbne cijevi. Modeli su detaljno opisani, nakon čega je opisan cjelokupan postupak koji je proveden unutar ANSYS Workbencha (program Ansys Fluent i Ansys CFX) kako bi se dobili željeni rezultati. Postupci uključuju predprocesiranje, procesiranje (definiranje fizikalnih parametara i sl.), te postprocesiranje, odnosno analizu i obradu podataka.

Dobiveni rezultati fizikalnih veličina iz analize prikazani su i uspoređeni tekstualno, grafički i brojevano u petom poglavlju. Rezultati su također prikazani uz pomoć korisnički definiranih poprečnih i uzdužnih ravnina na kojima je moguće vidjeti raspodjelu odabrane fizikalne veličine. Analizirane fizikalne veličine uključuju brzinu toka, relativan tlak, totalni

tlak, dinamičku viskoznost, vrtložnu viskoznost, kinetičku energiju turbulencije, mjeru deformacije smicanjem i brzine toka u smjerovima x osi (u), y osi (v) i z osi (w).

Na kraju, u šestom poglavlju dani su zaključci na temelju obrađene hidrauličke analize, te vlastita mišljenja i razmatranja na obrađenu temu diplomskog rada.

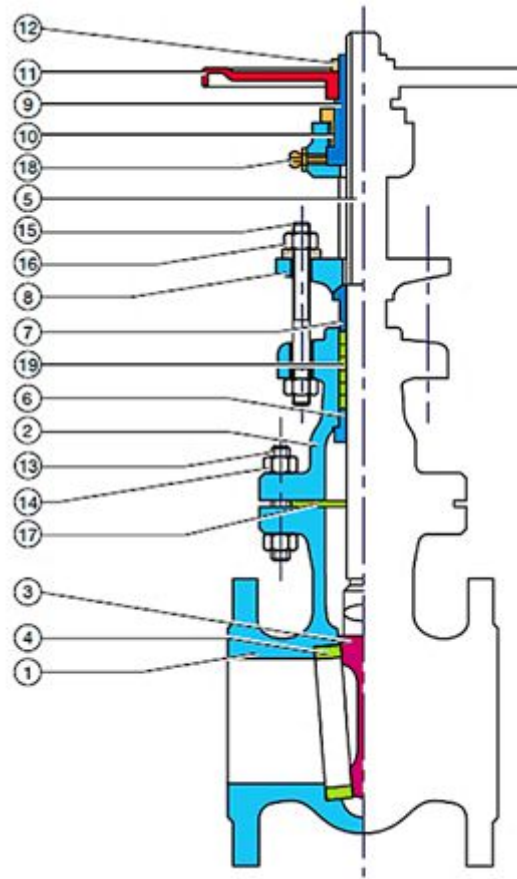
2. OSNOVNE ZNAČAJKE ZATVARAČA

U ovom su poglavlju diplomskog rada definirane i opisane svrhe i značajke pločastih i leptirastih zatvarača, jednako kao i opisi načina rada istih. Opisani su načini određivanja brzina toka, tlakova i protoka na spomenutim vrstama zatvarača i dani primjeri najpoznatijih i najkorištenijih zatvarača tih dviju vrsta u praksi.

2.1. Pločasti zatvarači

2.1.1. Svrha i značajke pločastih zatvarača

Pločasti (tablasti) zatvarači se koriste za potpuni prekid toka fluida, ili pri potpunoj otvorenosti za propuštanje punog toka kroz cjevovod [1]. Ovakvi zatvarači se ne smiju koristiti za regulaciju ili prigušivanje toka, jer precizna kontrola nije moguća. Velika brzina toka pri djelomičnoj otvorenosti zatvarača može izazvati eroziju stijenki zatvarača, vibracije i buku [2]. Mogu se koristiti za različite fluide, a najčešće su to pitke vode i otpadne vode unutar raspona temperature od -20 do +70 °C. Ovaj tip zatvarača može podnijeti brzine fluida do 5 m/s i tlakove do 16 bara [3]. Jedna od glavnih prednosti pločastih zatvarača je što pri potpunoj otvorenosti imaju jako mali otpor prilikom strujanja, uz kuglasti tip zatvarača najmanji u usporedbi s ostalim tipovima zatvarača. Ostale prednosti ovog tipa zatvarača su što padovi tlaka pri otvaranju/zatvaranju su manji nego kod drugih tipova zatvarača. Većina pločastih zatvarača se može koristiti obostrano i primjenjivi su pri većim tlakovima, a zahtjevi održavanja su manji nego kod ostalih tipova zatvarača. Glavni nedostatak ove vrste zatvarača je što je potreban velik broj okretaja ručke za otvaranje/zatvaranje zatvarača kako bi zatvarač došao iz položaja potpune otvorenosti do položaja potpune zatvorenosti. Od ostalih nedostataka bitno je napomenuti da su popravci teški zbog ograničenog pristupa samom zatvaraču [2]. Kako bi se postigao zadovoljavajući stupanj brtvljenja odnosno zatvorenosti, kada je zatvarač potpuno zatvoren, zahtjeva se kontakt od 360° između diska i njegovih ležišta. Na slici 1. je prikazan presjek pločastog zatvarača s njegovim osnovnim elementima.

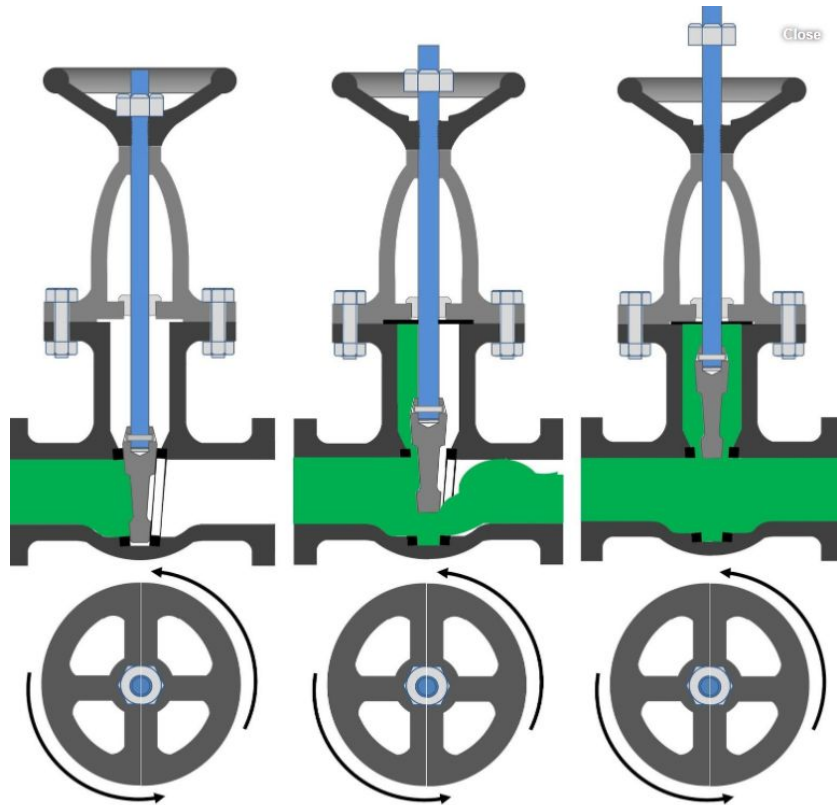


Slika 1. Presjek pločastog zatvarača [2], 1 - tijelo, 2 - poklopac, 3 - disk zatvarača, 4 - podnožje tijela, 5 - drška, 6 - stražnje podnožje, 7 - povratna brtva, 8 - brtvena prirubnica, 9 - matica drške, 10 - matica obruča, 11 - upravljačko okretno kolo, 12 - matica upravljačkog okretnog kola, 13 - navojni vijak, 14 - matica, 15 - navojni vijak, 16 - matica, 17 - poklopac brtve, 18 - sredstvo za podmazivanje, 19 - brtva.

Po načinu otvaranja pločasti (tablasti) zatvarači mogu biti vozni-kotrljajući (*eng. Stoneyevi*), ali mogu biti i sa valjcima, odnosno gusjenicama. Uslijed turbulencije kod istjecanja vode ispod zatvarača pri njegovom spuštanju, zbog razlike u hidrostatičkom tlaku s uzvodne i nizvodne strane dolazi do horizontalnih i vertikalnih vibracija, koje su u pravilu jače izražene. Da bi se pojava vertikalnih vibracija ublažila ili potpuno uklonila postoje pravila za konstrukciju zatvarača i oblikovanje ulaza, odnosno protočnog polja, koja se osnivaju na hidrauličkim laboratorijskim ispitivanjima i iskustvu. Vibracije zatvarača također su ovisne o težini zatvarača i o vodilicama. Nešto na što svakako treba obratiti pažnju kod pločastih zatvarača je njihovo brtvljenje koje ovisi o njihovom položaju. Ukoliko je zatvarač smješten na uzvodno lice brtvljenje je nizvodno, a ukoliko se nalazi u vertikalnom oknu brtvljenje može biti uzvodno i nizvodno [4].

2.1.2. Opis rada pločastih (tablastih) zatvarača

Okretanjem upravljačkog kola regulira se položaj pločastog zatvarača unutar cijevi od stupnja potpune zatvorenosti do stupnja potpune otvorenosti. Prilikom okretanja upravljačkog okretnog kola u smjeru kazaljke na satu energija i vrata zatvarača se pomiču za dolje sječući na taj način liniju toka gdje se u tom međupoložaju zatvarača vrata nalaze negdje između stupnja potpune otvorenosti i potpune zatvorenosti ovisno o stupnju otvorenosti, odnosno zakrenutosti kola. Prilikom okretanja upravljačkog kola u smjeru suprotnom od smjera kazaljke na satu, energija i vrata zatvarača se pomiču za gore sječući liniju toka fluida i na taj način se zatvarač potpuno podiže do stupnja potpune otvorenosti. Kada su vrata zatvarača potpuno podignuta, odnosno otvor na prostoru zatvarača potpuno otvoren otpor toku fluida biti će malen, tj. gotovo zanemariv [5]. Na slici broj 2 prikazani su koraci podizanja zatvarača i pokretanja toka.

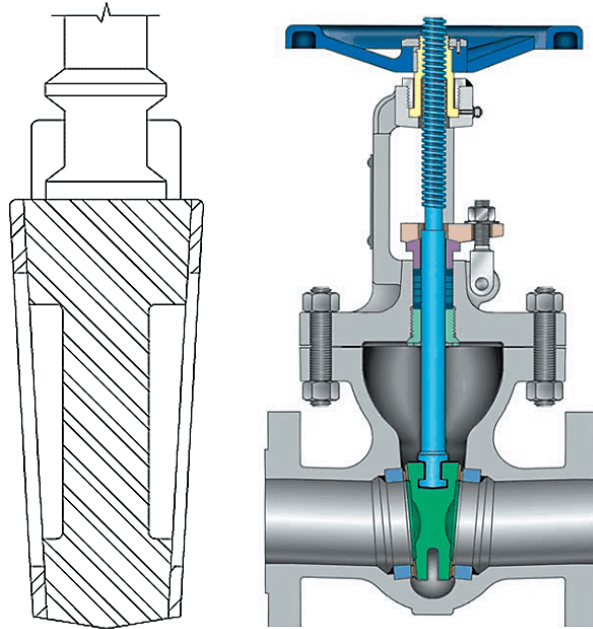


Slika 2. Postupak podizanja pločastog zatvarača [5]

2.1.3. Tipovi pločastih zatvarača u vodoopskrbnim sustavima

Postoji tri načina klasifikacije pločastih zatvarača. Prva podjela je po vrsti diska kod koje postoje dodatne tri podvrste, a to su kruti konusni klin, fleksibilni klin i posljednja razdjeljeni klin ili zatvarač paralelnih diskova. Druga podjela je po tipu tijela poklopca u koju spadaju četiri vrste, a to su: poklopac zatvaran vijcima, poklopac zatvaran zasunom, zavareni poklopac i poklopac zatvaran pritiskom tlaka. Posljednji način podjele je po tipu okretanja drške koji se sastoji od dvije vrste, a to su podižuća drška ili drška Y tipa (izvan drške i vijkastog tipa) i nepodižući tip drške [2].

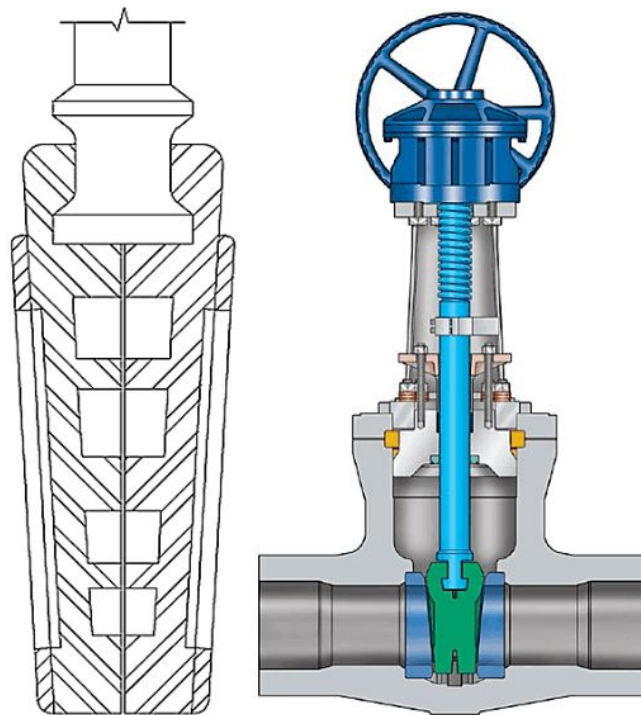
Kruti klin je najčešća i najkorištenija vrsta diska zbog njegove jednostavnosti i čvrstoće. Zatvarač s krutim klinom može se postaviti u bilo koju poziciju, i prikladan je za sve vrste fluida, a može se koristiti i kod turbulentnog toka. Naime, pri opterećenjima cijevi i termalnoj ekspanziji ova vrsta diska je najpodložnija propuštanju. Kruti klin je izložen termalnom zaustavljanju ukoliko je izložen radu na visokim temperaturama. Termalno zaustavljanje je pojava pri kojoj se klin zaglavi između svog postolja tokom ekspanzije metala. Ovakva vrsta diska najčešće se koristi u rasponu niskih do umjerenih tlakova i temperatura [2]. Na slici 3. prikazan je pločasti zatvarač s krutim klinom.



Slika 3. Pločasti zatvarač s krutim klinom [2]

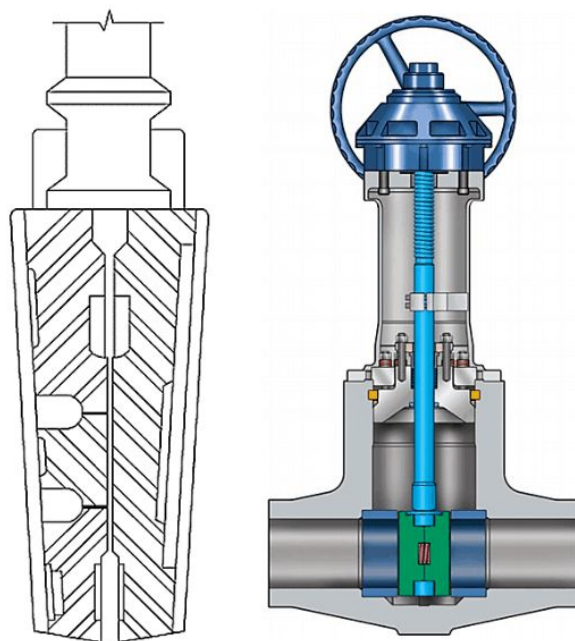
Fleksibilni klin je jednodijelni disk s rezom oko vanjskog ruba. Ti rezovi variraju u veličini, obliku i dubini. Plitak i uzak rez na rubu klina smanjuje fleksibilnost, ali povećava čvrstoću, dok duboki i širi rezovi povećavaju fleksibilnost i smanjuju čvrstoću. Ovakav tip

zatvarača pruža bolji otpor propuštanju fluida i bolji je pod utjecajem termalnog vezivanja. Često se koristi u sustavima s parom. Termalna ekspanzija pare ponekad izaziva distorziju, odnosno izvijanje. Fleksibilna vrata omogućuju izvijanje tokom kompresije ležišta zatvarača tokom termalne ekspanzije cijevi za paru i sprječavaju termalno vezivanje. Mana ove vrste diska je što se fluidne linije zadržavaju u disku što može rezultirati korozijom i naknadnim oslabljenjem istog [2]. Na slici 4. prikazan je pločati zatvarač s fleksibilnim klinom.



Slika 4. Pločasti zatvarač s fleksibilnim klinom [2]

Disk s razdjelnim klinom se sastoji od 2 kruta dijela koji su povezani uz pomoć posebnog mehanizma. U slučaju kada je pola diska izvan položaja, disk se može vratiti u potreban položaj. Ovakva vrsta diska može također biti u obliku paralelnog diska. Paralelni diskovi su rasterećeni oprugama tako da su uvijek u kontaktu s ležištem. Razdjelni klin je prikladan za uporabu kod nekondenzacijskih plinova i tekućina pri normalnoj i visokoj temperaturi. Sloboda pomicanja diska sprječava termalno vezivanje čak i kada je zatvarač zatvoren pri manjoj temperaturi. To znači da kada se linija ležišta zatvarača zagrije fluidom i proširi ne dolazi do termalnog vezivanja [2]. Na slici 5. prikazan je pločati zatvarač s razdjelnim klinom.



Slika 5. Pločasti zatvarač s razdjelnim klinom [2]

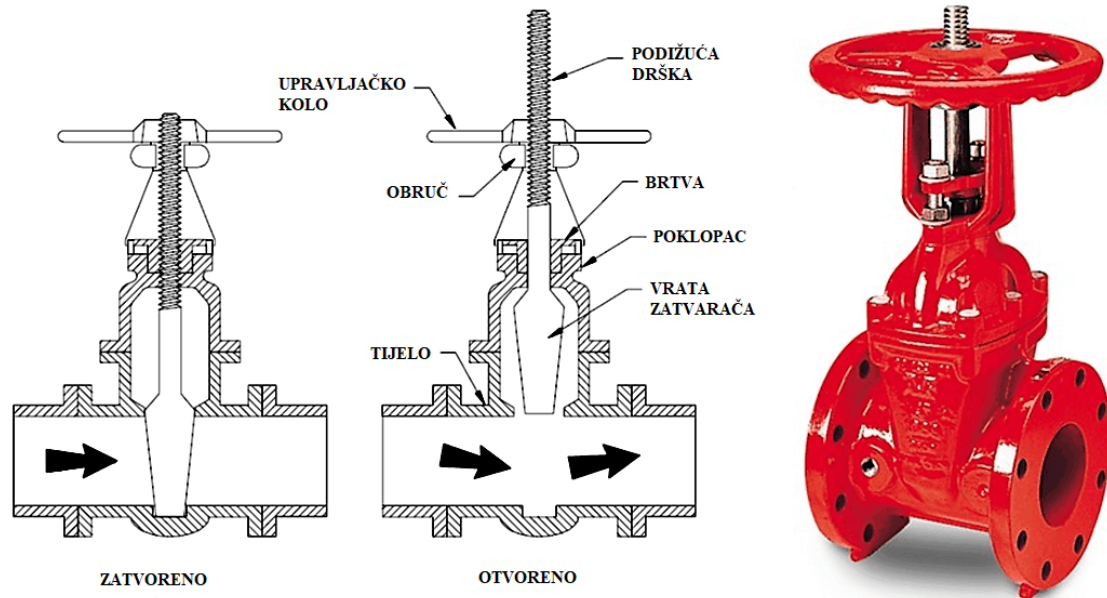
Na slici 6. su prikazani tipovi pločastog zatvarača ovisno o vrsti veze tijela zatvarača i poklopca. S lijeva na desno redom prikazani su poklopac zatvaran vijcima, poklopac zatvaran zasunom, zavareni poklopac i poklopac zatvaran pritiskom tlaka.



Slika 6. Vrste pločastih zatvarača ovisno o vezi tijela i poklopca [2]

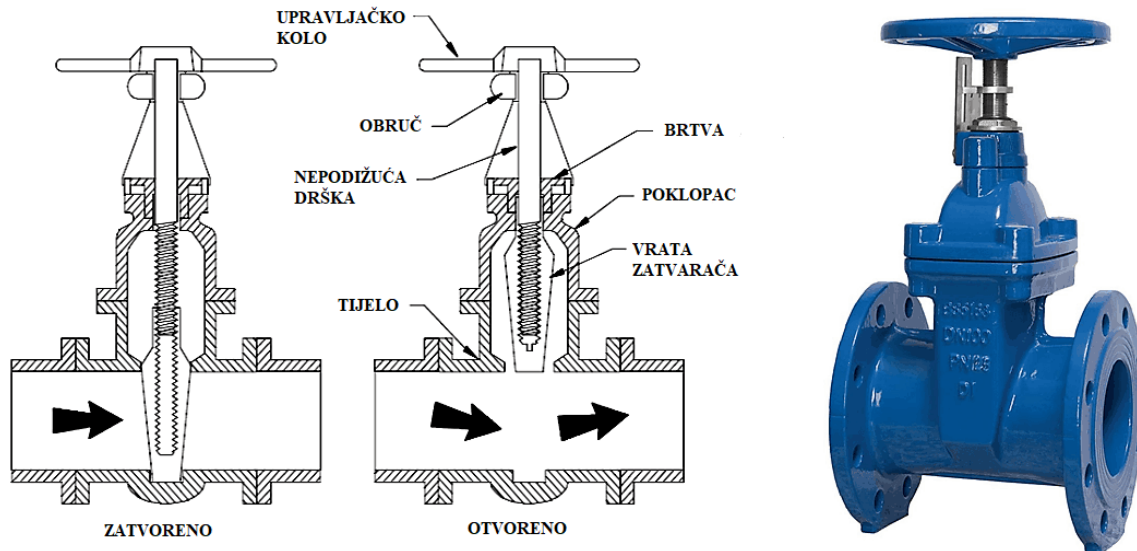
Poklopac zatvaran vijcima je najjednostavnije izrade i koristi se za jeftine zatvarače. Poklopac zatvaran zasunom je najviše korištena vrsta i koristi se kod najvećeg broja pločastih zatvarača. Ona zahtjeva brtvu za zatvaranje spoja između tijela zatvarača i poklopca. Zavareni poklopac je također često korištena vrsta gdje demontaža nije potrebna i manje su težine. Posljednji na slici 6. prikazan je poklopac zatvaran pritiskom tlaka koji se koristi isključivo u instalacijama visokih tlakova i visokih temperatura [2].

Posljednja podjela je po tipu okretanja drške. Prvi tip je Y pločasti zatvarač ili podižuća drška. Kod ovakvog tipa zatvarača drška se podiže prilikom otvaranja zatvarača, a spušta tokom zatvaranja zatvarača što je vidljivo na slici 7. Ovaj se tip temelji na dizajnu vanjskog vijka, kod kojeg se za razliku od dizajna unutarnjeg vijka samo mali dio izlaže toku pa se drška izdiže iznad upravljačkog kola.



Slika 7. Tip zatvarača s podižućom drškom (modificirano prema [2])

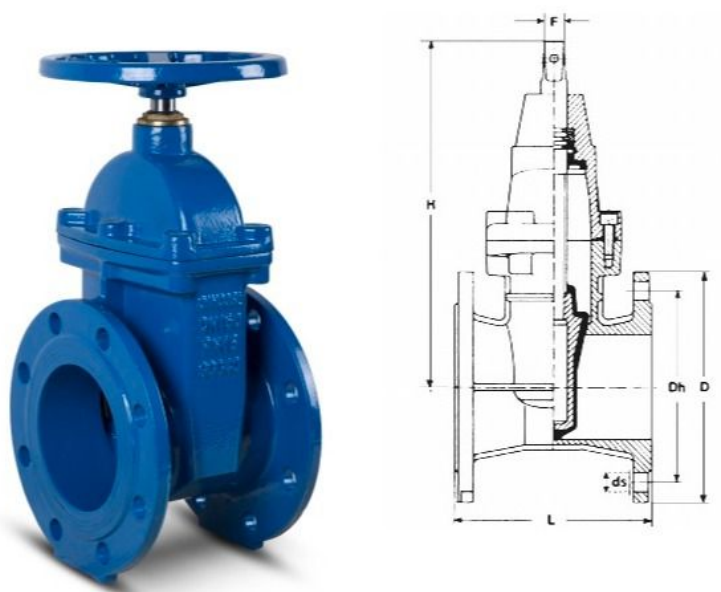
Kod tipa ne podižuće drške, odnosno zatvarača s unutarnjim vijkom nema uzidizanja drške. Disk zatvarača je navijen s unutarnje strane. Disk se pomiče uzduž drške prilikom njenog okretanja kao što je vidljivo na slici 8. Kod ove vrste zatvarača dijelovi drške su izloženi toku fluida. Zbog toga se ovaj dizajn koristi kod ograničenog prostora kako bi se omogućilo linearno pomicanje drške, a sam tok fluida ne izaziva eroziju, koroziju niti uništava materijal drške.



Slika 8. Tip zatvarača s nepodižućom drškom (modificirano prema [2])

2.1.4. Dimenzije i karakteristike pločastih zatvarača

Dimenzije, težina i ostale karakteristike zatvarača ovise o proizvođaču i namjeni. Kako bi se dočarao dojam dimenzija i specifikacija pločastih zatvarača za primjer je uzet pločasti zatvarač u duktilnom željezu talijanskog proizvođača Valvotubi, te je dana usporedba dimenzija istog zatvarača za različite promjere cijevi. Instalacija ovog zatvarača može biti horizontalna i vertikalna, a koristi se za opskrbu vodom, pitku vodu, protupožarne sustave i otpadne vode. Pločasti zatvarači s elastičnim ležajem u duktilnom željezu kategorije GGG40 ili GGG50 s ravnim tijelom i EPDM pokrovom klina, prikladni su za instalacije s pitkom vodom i prekriveni smolom koja nije štetna za zdravlje (Slika 9.).



Slika 9. Pločasti zatvarač s elastičnim ležištem u duktilnom željezu [6]

Ova vrsta zatvarača ima unutarnji vijak s nepodizajućom drškom. Poklopac tijela i klin su izrađeni od duktilnog željeza, upravljačko kolo od ljevanog željeza, a drška od nehrđajućeg čelika. Normalni pritisak koji mogu izdržati zatvarači ovog proizvođača iznose 16 bara. U tablici 1 slovom H označena je udaljenost od srednje osi cijevi do vrha zatvarača, slovom L raspon zatvarača, a slovom D rubna visina tijela zatvarača. Tablicom 1. su prikazane dimenzije spomenutih oznaka za pojedine promjere cijevi DN u milimetrima, te njihova masa u kilogramima.

Tablica 1. Dimenzije pločastog zatvarača proizvođača Valvotubi [6]

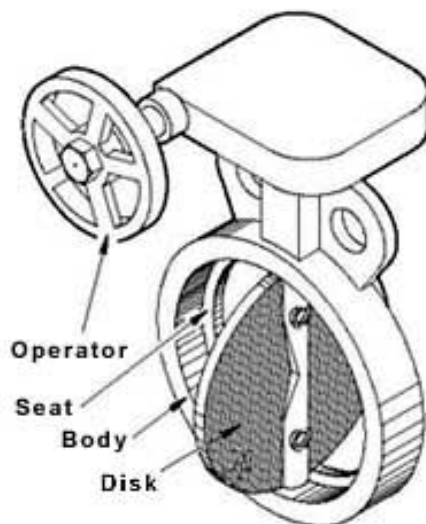
DN [mm]	L [mm]	H [mm]	D [mm]	Masa [kg]
40	140	220	150	8
50	150	230	165	10
65	170	240	185	13
80	180	280	200	16
100	190	330	220	19
125	200	390	250	27
150	210	460	285	35
200	230	550	340	56
250	250	660	405	81
300	270	760	460	115
350	290	820	520	221
400	310	950	580	257
450	330	970	640	303
500	350	1120	715	363
600	390	1300	840	600

2.2. Leptirasti zatvarači

2.2.1. Svrha i značajke leptirastih zatvarača

Leptirasti zatvarači se koriste kod cijevnih sustava s niskom temperaturom i niskim tlakom gdje je prostor ograničen. Mogu se koristiti za izolaciju i regulaciju toka zbog karakterističnog načina rotacije zatvarača. Koriste se za regulaciju velikih količina fluida, gustih plinova i mješavina, a njihova uporaba nije preporučljiva kod ugljikovodika ili ostalih zapaljivih tvari. Oblik ove vrste zatvarača u obliku diska, dvostrukih ili trostrukih odmaknutih osovinama omogućuje kontrolu toka, uz nedostatak mogućnosti pojave ostataka rezidualnih materijala unutar cijevi [7]. Kako bi se olakšalo otvaranje, veliki leptirasti zatvarači imaju ugrađen pokretač u obliku mjenjača kod kojeg je upravljačko kolo spojeno s drškom pomoću mjenjača. Samim time smanjene su sila, ali i vrijeme pokretanja upravljačkog kola. Glavni zahtjev pri ugradnji leptirastog zatvarača je taj da zatvarač bude ugrađen u otvorenom položaju, iz razloga što ukoliko ga se ugradi zatvorenog dolazi do uklještenja gumenog obruba i diska zatvarača što može otežati njegovo otvaranje. Glavna prednost leptirastih zatvarača je što ih se može koristiti kod velikih promjera cijevi i velikih protoka zbog njihovog oblika, lagane konstrukcije i oblika koji zahtjeva znatno manje prostora u usporedbi s drugim zatvaračima. Ostale prednosti koje je potrebno spomenuti su brzo otvaranje, odnosno

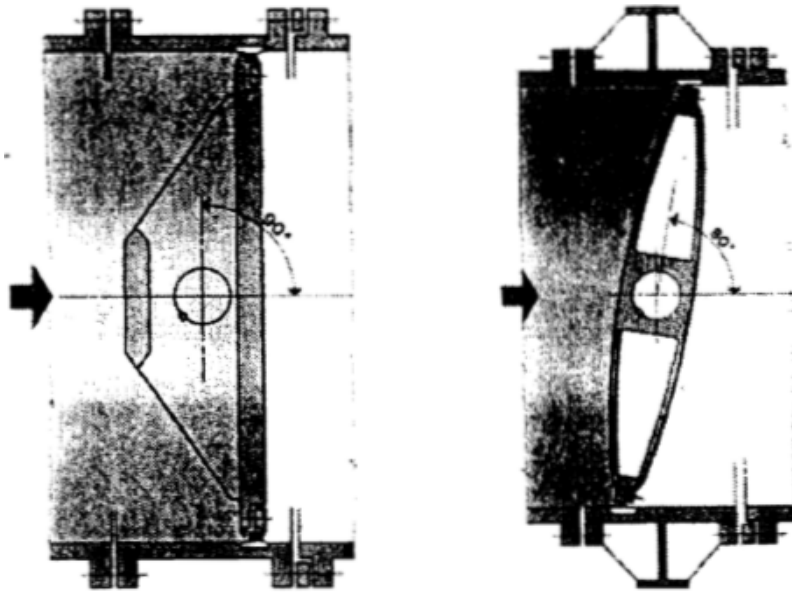
zatvaranje, manji troškovi održavanja u usporedbi s drugim vrstama zatvarača, padovi tlaka su mali duž zatvarača, njihova izrada zahtjeva manje materijala, pa su samim time i jeftiniji za izradu. Od nedostataka je potrebno spomenuti da je prigušenje ograničeno za uporabu kod diferencijalnih pritiska od 30° do 80° otvorenosti. Osim njega drugi veći nedostatak je mogućnost pojave kavitacije i gušenja toka zbog stalnog gubitka tlaka na zatvaraču. Turbulentni tok može prouzročiti zakretanje zatvarača [8].



Slika 10. Dijelovi leptirastog zatvarača [9]

Na slici 10. prikazana je shema leptirastog zatvarača s dijelovima. Upravljačko kolo (*eng. operator*) služi za otvaranje, odnosno zatvaranje zatvarača, dok ležište zatvarača (*eng. seat*) služi za popunjenje prostora između diska tijela zatvarača. Unutar tijela zatvarača (*eng. body*) nalazi se disk zatvarača (*eng. disk*). Materijal ležišta, odnosno prirubnice može biti od raznih elastomera i polimera. Unutar tijela zatvarača nalazi se disk koji služi za reguliranje protoka. Također je bitno napomenuti dršku koja spaja tijelo zatvarača i disk, a ona može biti jednodijelna i dvodijelna [10].

Leptirasti zatvarači mogu imati horizontalnu ili vertikalnu osovinu i zatvarati se pod kutem od 90° ili 80° . Na slici 11. su prikazani leptirasti zatvarači s horizontalnom osovinom, lijevo kut zatvaranja od 90° , a desno kut zatvaranja od 80° .



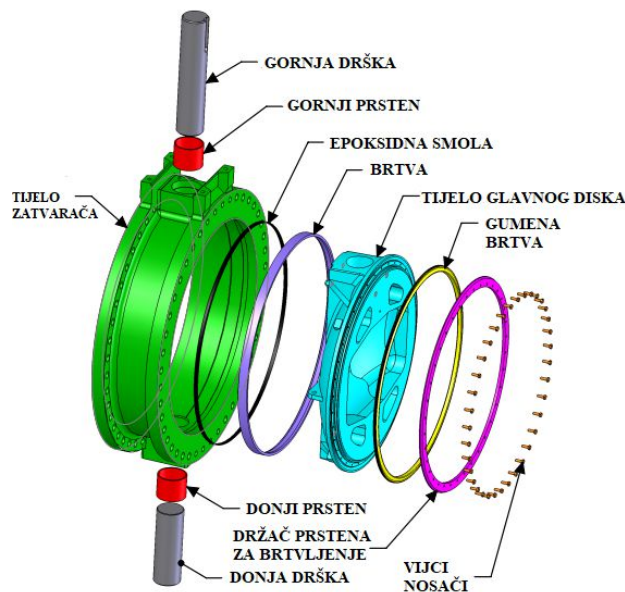
Slika 11. Leptirasti zatvarači s horizontalnom osovinom, kut zatvaranja 90° i 80° [4]

Usljed turbulencije kod istjecanja vode ispod zatvarača pri njegovom spuštanju, zbog razlike u hidrostatičkom tlaku s uzvodne i nizvodne strane dolazi do horizontalnih i vertikalnih vibracija, koje su jače izražene. Da bi se pojava vertikalnih vibracija ublažila ili potpuno otklonila postoje pravila za konstrukciju zatvarača i oblikovanje protočnog polja, koja se osnivaju na hidrauličkim laboratorijskim ispitivanjima i iskustvu. Vibracije zatvarača također ovise o težini zatvarača i o vodilicama koje mogu biti ubetonirani čelični U profili ili staze s tračnicama na uzvodnom licu brane. Cilindrično tijelo i disk zatvarača su od visokovrijednog čelika otpornog na koroziju (Slika 12.). Danas se najčešće koriste specijalno oblikovane neoprenske brtve. Za rukovanje leptirastim zatvaračem se koriste hidraulički uređaji - servomotori. Leptirasti se zatvarači lako stavljaju u pogon i za male pritiske i kod zatvaranja ne trebaju dodatnu energiju. Primjenjuju se kod malih i velikih hidrostatičkih pritiska i to za tlakove od 1 do 25 bara. Promjeri u kojima se proizvode su u rasponu od 300 mm do 600 mm [4].



Slika 12. Leptirasti zatvarač s vertikalnom osovinom promjera 2800 mm [11]

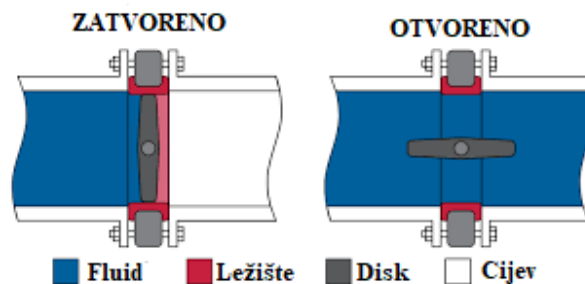
U nastavku diplomskog rada nabrojani su razlozi iz kojih je bolje ugraditi leptirasti (Slika 13.) umjesto pločastog zatvarača. Leptirastim zatvaračima je lakše upravljati, njihova je ugradnja također jednostavnija zbog manje težine i manjih prostornih zahtjeva. Za otvaranje i zatvaranje leptirastog zatvarača potrebno je samo četvrtina okretaja kola u usporedbi s pločastim, pa je samim time otvaranje i zatvaranje zatvarača brže. Okna su značajno manja kod leptirastih zatvarača, pa je i pristupačnost mnogo bolja. Cijena je veća kod pločastih zatvarača zbog većih zahtjeva i veće težine [10].



Slika 13. Detaljan prikaz dijelova leptirastog zatvarača (modificirano prema [12])

2.2.2. Opis rada leptirastih zatvarača

Postupak rada zatvarača najsličniji je kuglastom zatvaraču. Zovu ih i zatvarači s četvrtinom okretaja iz razloga što se zatvarač može potpuno otvoriti, odnosno zatvoriti s četvrtinom okretaja. Okretanjem kola regulira se stupanj otvorenosti zatvarača čime se također može obavljati i reguliranje (Slika 14.). Kada je zatvarač zatvoren, disk je okrenut tako da potpuno zatvara tok fluida, dakle okomito ili pod kutem od 80° obzirom na os cijevi, ovisno o vrsti zatvarača. Kada je zatvarač potpuno otvoren, disk je okrenut četvrtinu okretaja i na taj način omogućuje nesmetano strujanje fluida.



Slika 14. Zatvoreni i otvoreni leptirasti zatvarač s horizontalnom osovinom (modificirano prema [13])

2.2.3. Tipovi leptirastih zatvarača u vodoopskrbnim sustavima

Leptirastih zatvarača ima različitih tipova, od kojih je svaki prilagođen za određene funkcije i raspone tlaka. Kategorizacija se može temeljiti na tipu završetka tijela zatvarača, odnosno vezi tijela i zatvarača i vrsti pokretanja zatvarača koja može biti ručna ili automatizirana. Podjela po tipu završetka sastoji se od 4 tipa prikazana na slici 15. s lijeva na desno: „međuflanšni“ tip, tip s vijcima na pola tijela, tip s vijcima i obostrano izbočeni tip. Osim njih postoji i tip s bočno zavarenim krajem koji je direktno zavaren za cijev, pa se zbog tog koristi kod visokih tlakova. Njegov prikaz je dan na slici 16.



Slika 15. Podjela leptirastih zatvarača ovisno o tipu završetka tijela [14]



Slika 16. Bočno zavareni leptirasti zatvarač [15]

Međuflašni leptirasti zatvarač nema vlastite prirubnice, već se ugrađuje između prirubnica na cijevima. Ovaj tip zatvarača može imati rupe na prirubnici. Prirubnice cijevi su povezane dugim vijcima koji se pružaju cijelim tijelom zatvarača. Brtvljenje između zatvarača i prirubnice se postiže brtvljenjem, obručima i ravnim licima zatvarača. Ovakav tip zatvarača je namjenjen za sprječavanje povratnog toka i ne može se koristiti kao izolacijski zatvarač [14].

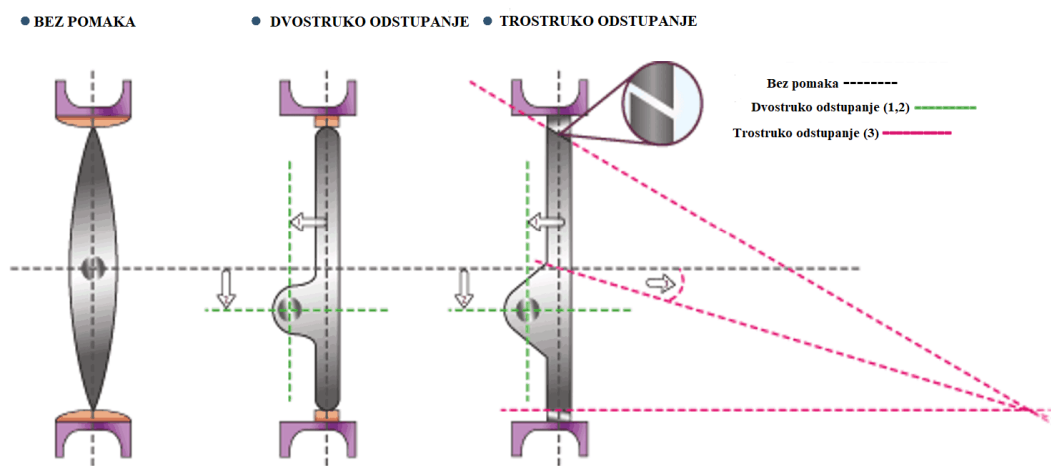
Leptirasti zatvarač s vijcima ima vijke s navojem izvan tijela zatvarača. Dva seta vijaka povezuju prirubnice cijevi sa svakom stranom vijka bez matica. Ovakav tip omogućuje skidanje jedne strane bez utjecaja na drugu stranu zatvarača. Koriste se kod niskih tlakova i za razliku od tipa s tankom pločicom ovaj tip leptirastog zatvarača nosi težinu cijevu kroz tijelo zatvarača.

Upravljanje leptirastim zatvaračima može biti ručno ili automatizirano električnim (Slika 17.), pneumatskim ili hidrauličkim pokretačima. Ti uređaji omogućuju precizno okretanje diska zatvarača u svim pozicijama između potpune otvorenosti i potpune zatvorenosti. Automatizirani pokretači su pouzdana metoda za upravljanje s udaljenosti, oni ujedno omogućuju i brz rad većih zatvarača. Pokretači mogu biti napravljeni tako da ostanu otvoreni prilikom kvara pokretača ili da ostanu otvoreni prilikom kvara, ali često imaju i upravljačko kolo za ručno upravljanje u slučaju kvara. Pokretači mogu biti električni koji koriste električni motor za okretanje drške zatvarača, pneumatski koji zahtijevaju stlačeni zrak kako bi se pomakao klip za otvaranje, odnosno zatvaranje zatvarača. Hidraulički imaju zahtjev za hidrauličkim pritiskom kako bi se pomaknuo klip [14].



Slika 17. Leptirasti zatvarač s električnim pokretačem [14]

Diskovi leptirastih zatvarača mogu biti centrični ili ekscentrični obzirom na tijelo zatvarača. U nastavku su pojašnjene tri glavne vrste ovisno o položaju diska leptirastog zatvarača. Leptirasti zatvarač bez pomaka koristi se za male tlakove. Disk i os drške su kod ovog slučaja u ravnini s tijelom zatvarača. Pri otvorenom položaju, disk dijeli tok na dva jednaka dijela kada je disk na sredini i paralelan s tokom. Ovaj tip zatvarača ima elastično ležište. Brtvljenje je postignuto kada disk oblikuje ležište. Između ležišta i diska postoji trenje što je ujedno i nedostatak zatvarača bez ekscentra. Na slici 18. su prikazani su redom zatvarač bez pomaka odnosno centrični, zatvarač s dvostrukim odstupanjem i zatvarač s trostrukim odstupanjem [8].



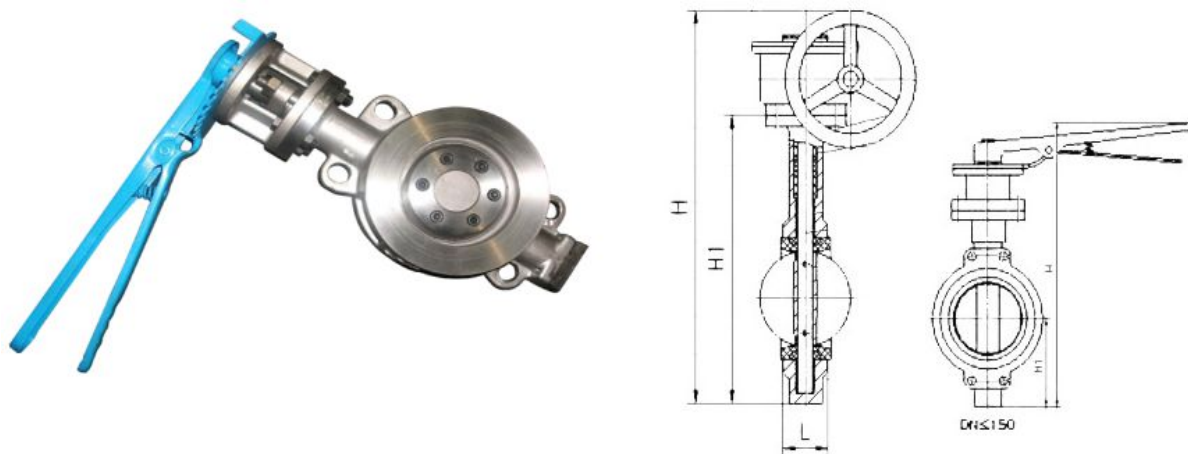
Slika 18. Leptirasti zatvarači bez i sa pomakom (modificirano prema [8])

Kod zatvarača s dvostrukim odstupanjem, disk je pomaknut od linije zatvarača i od centralne linije tijela zatvarača kao što je prikazano na slici 18. zelenom isprekidanom bojom

na srednjem zatvaraču. Pomak uzrokuje stvaranje ekscentriciteta i izdizanje ležišta van spoja. Dvostruki pomak omogućuje precizno otvaranje i zatvaranje, jer je trenje prisutno samo prvih nekoliko stupnjeva otvaranja i posljednjih nekoliko stupnjeva zatvaranja (približno 10° otvaranja i zatvaranja). Kod tipa zatvarača s trostrukim odstupanjem, treći pomak nastaje zbog geometrijskog oblika površine ležišta koje je napravljeno strojem u stožastom profilu što rezultira nastajanje pravokutnog stožca što je vidljivo na desnom zatvaraču na slici 18. gdje je spoj prikazan povećano. Takva pojava omogućuje dodirivanje bez trenja kroz operacijski period. Do kontakta dolazi jedino pri završnoj točki zatvaranja od 90° djelujući kao mehaničko zaustavljanje. Zatvarači s metalnim ležištem koriste tip zatvarača s trostrukim odstupanjem [8].

2.2.4. Dimenzije i karakteristike leptirastih zatvarača

Dimenzije, težina i ostale karakteristike zatvarača ovise o proizvođaču i namjeni. Kako bi se dočarao dojam dimenzija i specifikacija pločastih zatvarača za primjer je uzet „međuflansni“ leptirasti zatvarač talijanskog proizvođača Valvotubi, te je dana usporedba dimenzija istog zatvarača za različite promjere cijevi. Instalacija ovog zatvarača može biti horizontalna i vertikalna, a koristi se za regulaciju ili otvaranje i zatvaranje zatvarača.



Slika 19. Međuf flanšni leptirasti zatvarač u lijevanom čeliku [16]

Leptirasti zatvarač s tijelom, diskom i drškom od lijevanog čelika, upravljačkim kolom od duktilnog željeza s premazom visoko kloriranim polietilenom koji nije štetan za zdravlje. Ovaj je zatvarač s malim trenjem, četvrtinom okretaja i centriranim diskom. Rub i ležište testirani su hidrostatički, te je utvrđeno da je maksimalan tlak za rub 30, a za ležište 23 bara. Na slici 19. slovom H označena je udaljenost od samog dna tijela zatvarača do kraja

upravljačkog kola, odnosno kod ovog modela ručke, slovom L raspon zatvarača u ležištu, a slovom H_l udaljenost od dna zatvarača do njegove centralne osi. Tablicom 2. su prikazane dimenzije spomenutih oznaka za pojedine promjere cijevi DN u milimetrima, te njihova masa u kilogramima. Kao što je vidljivo promjeri cijevi za koje proizvođač Valvotubi proizvodi zatvarače su od 50 do 600 mm, a mogu biti i do promjera od 6000 mm, što je ujedino i najveći leptirasti zatvarač ikad proizveden. Napravila ga je tvrtka Andritz hydro 2014. godine [16].

Tablica 2. Dimenzije leptirastog zatvarača proizvođača Valvotubi [16]

DN [mm]	L [mm]	H [mm]	D [mm]	Masa [kg]
50	42	241	355	10
65	44,7	264	378	10
80	45,2	276	390	11
100	52,1	314	428	14
125	54,4	340	454	30
150	55,8	365	479	34
200	60,6	435	628	66
250	65,5	495	688	98
300	76,9	579	767	134
350	76,9	635	823	168
400	86,5	709	990	200
450	105,6	750	1031	250
500	131,8	841	1126	334
600	152	1021	1236	434

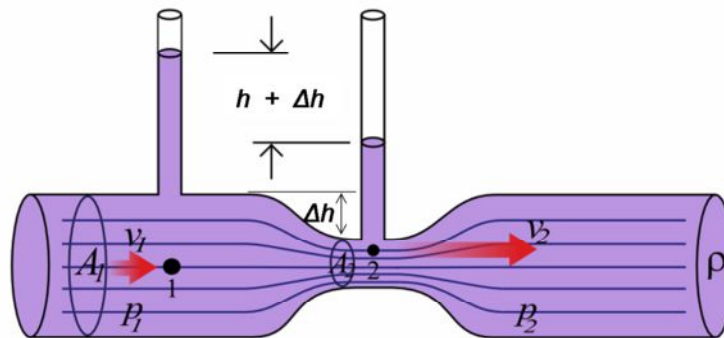
2.3. Načini mjerenja brzina, protoka i tlakova kod leptirastih i pločastih zatvarača

U nastavku diplomskog rada opisani su načini mjerenja protoka, brzina i tlakova unutar cijevnih sustava pod tlakom.

2.3.1. Mjerenje brzina fluida u cijevima s leptirastim i pločastim zatvaračima

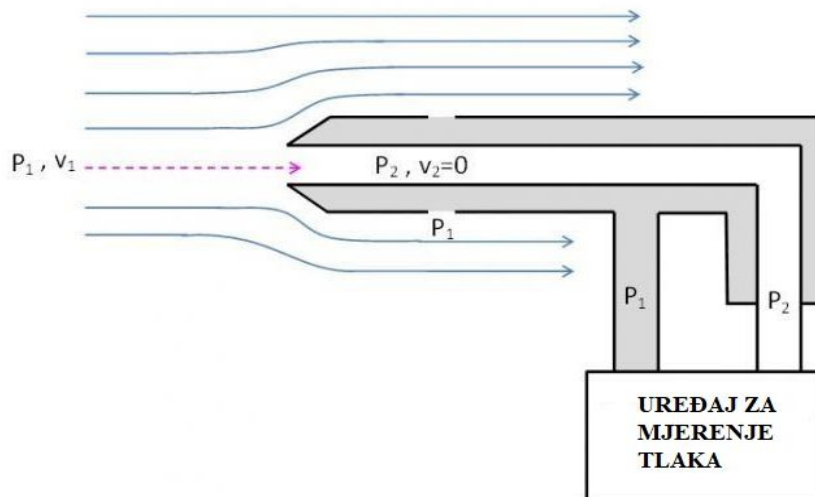
Brzine toka se uvijek mjere ispred ili iza zatvarača, jer je na samom zatvaraču prisutno turbulentno stanje, pa mjerenja ne bi bila adekvatna, a brzine toka se većinom dobivaju na temelju izmjerenih protoka. Najčešći načini mjerenja brzine fluida su uz pomoć Venturijeve cijevi, Pitotove cijevi, anemometra i posebnih vrste pretvornika, a sama brzina često se računa iz izmjerenih protoka. Kod Venturijeve cijevi iz poznavanja razlike tlaka u mirnom fluidu i fluidu koji struji može se izračunati brzina strujanja. Ova se metoda temelji na Bernoullijevoj jednadžbi i jednadžbi kontinuiteta. Na slici 20. je prikazana Venturijeva cijev, kod koje je u

točki 1 brzina fluida niža nego u mjernoj točki 2, jer je poprečni presjek u točki 1 veći nego u točki 2.



Slika 20. Venturijeva cijev [17]

Pitotova cijev (Slika 21.) ili Prandtl-Pitotova cijev služi za precizno mjerenje brzine strujanja, i temelji se na razlici tlaka zastoja i statičkog tlaka koji zbog oblika cijevi nastaju u struji fluida. Postoje tri varijante: osnovna Pitotova cijev, Prandtl-ov instrument i Coleov pitometar. Osnovna Pitotova cijev mjeri cijelokupan pritisak na ulazu u cijev s piezometrom smještenim na bočnom zidu cijevi ili kanala, razlika između dva čitanja daje brzinsku visinu. Prandtl-ov instrument ima otvore za pritisak postavljene na način da tokom malog pada tlaka prilikom velike brzine toka na početku cijevi izjednačenje obavlja porastom tlaka prilikom smanjenja brzine toka ispred vertikalnog kraka instrumenta. Najčešće korištena varijanta Pitotove cijevi je Coleov pitometar koji se sastoji od dvije cijevi s vrhovima okrenutim u suprotnom smjeru. Cijevi se mogu okretati tako da se instrument može umetnuti u cijev. Nizvodna cijev registrira negativan pritisak, jer je njen izlaz na tragu instrumenta. Visinska razlika u razini vode iznosi $v^2/2g$ (brzinska visina) iz čega se jednostavno dobiva brzina. Potrebno je napomenuti da je za brzine manje od 0,3 m/s preporučljivo koristiti jednu od druge dvije metode spomenute prethodno. Pitotova cijev bi trebala biti što manja jer se pretpostavlja da se brzina toka u cijevi odnosi na centralnu os cijevi. Iz tog razloga kod velikog presjeka Pitotove cijevi dolazi do velikog gradijenta brzine toka, pa fluid može ući kroz jednu stranu cijevi i izaći na drugu i na taj način pokazati veću brzinu [18].



Slika 21. Pitotova cijev (modificirano prema [19])

Anemometar koji se koristi za određivanje brzine fluida može biti ultrazvučni, laserski Doplerov i anemometar s vrućom žicom (Slika 22). Pomoću tih 3 vrsta anemometra moguće je odrediti brzinu fluida. Ultrazvučni koristi ultrazvučne valove, dok laserski funkcionira na načelu križanja dvije zrake monokromatskog koherentnog svjetla. Najčešće korišteni instrument za mjerenje brzine je anemometar s vrućom žicom kod kojeg se kratka tanka žica platine napaja sa električnom energijom koja se pretvara u toplinu. S površine žice toplina se prenosi u kapljevину. Definirane su tri bilance, a to su: bilanca topline oko žice anemometra, bilanca za slučaj konstantnog napona napajanja i bilanca za slučaj stalne struje kroz osjetilo. Za te se bilance izvode nelinearne korelacije između otpora (pada napona) i protoka za tekućinu, pa se na temelju toga dobiva brzina tekućine.



Slika 22. Anemometar s vrućom žicom [20]

Posljednja metoda mjerenja brzine fluida u cijevi koju je bitno spomenuti su pretvornici zvani „*moving member*“ mjeraci koji se dijele u dvije podvrste, turbine i hidrometrijski kotači. Ovi mjeraci mogu biti osovinski turbinski mjeraci, radijalni turbinski mjeraci i mjeraci s hidrometričkim kotačem. Mjerač s osovinskom turbinom se sastoji od kružnog tijela s sustavom oštrica (Slika 23.). Tokom toka fluida između oštrica, oštrice se okreću pod utjecajem sila toka. Brzina rotacije oštrica proporcionalna je brzini fluida koji prolazi kroz tijelo mjerača, pa je s toga bitno brojiti broj okretaja oštrica. Ova je metoda vrlo precizna, a sama konstrukcija tijela i oštrica vrlo je bitna za preciznost mjerenja. Uzevši u obzir da ovaj mjerač ovisi o magnetskom polju, bitno je uzeti u obzir da ovaj mjerač nije prikladan za fluide koji imaju utjecaja na magnetska polja [21].



Slika 23. Aksijalni turbinski mjerač brzine [22]

Radijalni turbinski brzinomjer prikazan na slici 24. primjereniji je za cijevi malih promjera i funkcionira na istom principu kao aksijalni turbinski mjerač. Mana ovog mjerača je što mjeri samo u jednoj točki, a ne u cijelom profilu. Poput aksijalnog uređaja ovakav mjerač uzvraća puls s frekvencijom proporcionalnom toku. Jeftinija varijanta turbinskih brzinomjera je mjerač s hidrometrijskim kotačem čija je unutarnja konstrukcija slična kao kod turbinskog mjerača, ali umjesto oštrica kotač je okomit na tok, a princip funkcioniranja je jednak. Izlazna frekvencija proporcionalna je brzini toka [21].

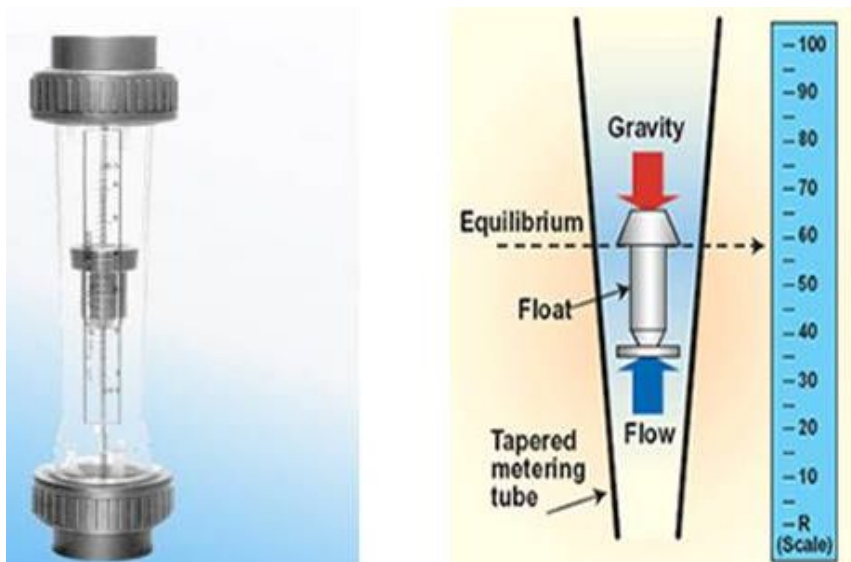


Slika 24. Radijalni turbinski mjerač brzine [21]

2.3.2. Mjerenje protoka u cijevima s leptirastim i pločastim zatvaračima

Razlikujemo dvije vrste mjerenja protoka, a to su mjerenje volumnog protoka, odnosno obujma fluida koji prolazi kroz neku točku u jedinici vremena (m^3/s) kojeg označavamo s Q i mjerenje masenog protoka \dot{m} koji označava masu fluida koja prolazi kroz neku točku u jedinici vremena (kg/s), a jednak je umnošku volumnog protoka i gustoće fluida. Protok se može mjeriti na osnovu pada tlaka na suženju u cijevi, elektrodinamički, ultrazvučno, laserskim Dopplerovim anemometrom, anemometrom s vrućom žicom, Thomasovim uređajem, mehaničkim anemometrima, rotametrom, mjernom prigušnicom, Dallovim (kraća vrsta Venturijeve cijevi) i Venturijevim cijevima, Pitotovom cijevi, Coriolisovim mjernim senzorom, elektromagnetski, vrtloženjem ili turbulencijom, i slično. U nastavku su opisane neke od ovih metoda.

Rotametar je najčešće upotrebljavani uređaj za mjerenje protoka u laboratoriju, a često se koristi i u procesnoj industriji zbog njegove jednostavnosti, široke primjenjivosti ozbirom na mogućnost mjerenja protoka plinova i kapljevina i zbog vrlo velikog mjernog opsega. Mjerenje se zasniva na povezanosti pada tlaka koji nastaje protjecanjem kroz suženje. Suženja su kod rotametra promjenjiva, što nije slučaj kod drugih ugrađenih suženja. Suženje čini ronilo koje je uronjeno u tekućinu koja protječe kroz prozirnu vertikalnu cijev promjenjivog radijusa, najužeg presjeka na ulazu u cijev, a najšireg na izlazu (Slika 25.). Tekućina protječe kroz prsten između ronila i cijevi. Položaj ravnoteže određen je težinom ronila, uzgonom i silom koja tekućina djeluje na ronilo. Ronila (*eng. float*) mogu biti različitih oblika i materijala kao što su staklo, metal ili plastika, a sam oblik ovisi o mjernom opsegu i nalaze se unutar sužavajuće mjereće cijevi (*eng. tapered metering tube*). Za izračun protoka potrebno je poznavanje gustoća tekućine i ronila, volumena i površine ronila i faktora trenja između tekućine i ronila. Ravnotežna linija (*eng. equilibrium*) daje uz pomoć mjerne skale (*eng. scale*) mogućnost očitavanja vrijednosti. Na utjecaj ronila utječu gravitacija (*eng. gravity*) i tok (*eng. flow*). Loša strana rotametra je nemogućnost mjerenja protoka tekućina u kojima ima krutih čestica ili kapljevina sa mjehurićima plinova [23].



Slika 25. Rotametar [24]

Sljedeći način mjerenja je elektrodinamičko mjerenje (Slika 26.). Ovaj je način jedan od najprimjenjenijih načina mjerenja protoka u cijevnim sustavima pod tlakom. Tekućina je električki vodljiva i njezino protjecanje kroz magnetsko polje je analogno gibanju svitka električnog vodiča između polova magneta. Mjerni signal za protok je inducirana elektromagnetska sila između elektroda čiji je iznos određen umnoškom konstante proporcionalnosti, jakosti magnetskog polja, promjera cijevi i srednje brzine tekućine. Kod ovakvog tipa mjerenja električna vodljivost ne utječe na mjerni signal, a mjerni signal nije ovisan o gustoći, viskoznosti, temperaturi i tlaku tekućine. Bitno je spomenuti da protjecanjem kroz uređaj ne dolazi do pada tlaka [23].



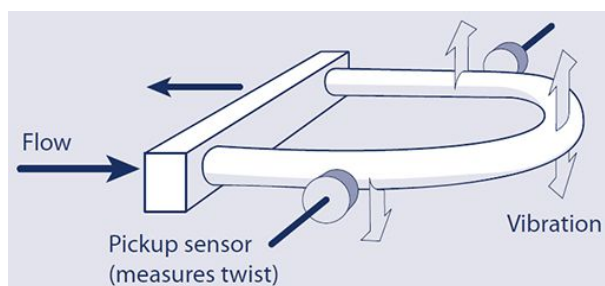
Slika 26. Elektromagnetski mjerac protoka [25]

Ultrazvučno mjerenje protoka se zasniva na Dopplerovom efektu, odnosno na činjenici da frekvencija ovisi o brzini izvora (Slika 27.). Mjeri se razlika vremena prostiranja ultrazvuka. Izvor i detektor su piezoelektrični kristali frekvencije 5 MHz. Kod ove metode mjerenja također nema pada tlaka protjecanjem kroz uređaj. Kada u cijevi nema strujanja, frekvencija ultrazvuka odašiljana u cijev i reflektirana su jednake, dok pri prisutnosti toka reflektirana frekvencija nije jednaka odašiljanoj, što je rezultat Dopplerovog efekta. Na temelju razlike frekvencija poslanog i reflektiranog signala određuje se protok. Što je brzina toka fluida veća to je razlika između frekvencija veća. Nedostatci ovog načina mjerenja protoka su cijena i osjetljivost na vibracije.



Slika 27. Ultrazvučni mjerač protoka [26]

Potrebno je spomenuti Coriolisov princip mjerenja masenog protoka koji je vrlo efektivan. Coriolisov mjerač protoka se sastoji od cijevi koja je pod utjecajem vibracije (Slika 28.). Prilikom prolaska toka (*eng. flow*) fluida kroz cijev moment masenog protoka izaziva vibraciju (*eng. vibration*) koju mjeri prikupni senzor (*eng. pickup sensor*) za mjerenje izvijanja, što uzrokuje izvijanje cijevi u fazama. Te se faze mogu mjeriti i linearno usporediti proporcionalno s tokom [27].



Slika 28. Coriolisov princip mjerenja masenog protoka [27]

U nastavku je prikazan tehnički dodatak proizvođača zatvarača AVK, u ovom slučaju za pločasti zatvarač. U tabličastom prikazu na slici 29. prikazan je protok za cijevi promjera od 40 do 800 mm za brzine toka fluida u rasponu od 1 do 5 m/s po inkrementima od 0,5 m/s. U posljednje dvije tablice prikazana je vrijednost K_v za iste promjere cijevi, sa stupnjevima otvorenosti zatvarača od 10 do 100% otvorenosti. Vrijednost K_v predstavlja stvaran tok vode (m^3/h) koji uzrokuje pad tlaka od 1 bara.

Flow velocity (m/sec)	Q m ³ /h							
	DN 40	DN 50	DN 65	DN 80	DN 100	DN 125	DN 150	DN 200
1.0	4.5	7.1	11.9	18.1	28.3	44.2	63.6	113.1
1.5	6.8	10.6	17.9	27.1	42.4	66.3	95.4	169.6
2.0	9.0	14.1	23.9	36.2	56.5	88.4	127.2	226.2
2.5	11.3	17.7	29.9	45.2	70.7	110.4	159.0	282.7
3.0	13.6	21.2	35.8	54.3	84.8	132.5	190.9	339.3
3.5	15.8	24.7	41.8	63.3	99.0	154.6	222.7	395.8
4.0	18.1	28.3	47.8	72.4	113.1	176.7	254.5	452.4
4.5	20.4	31.8	53.8	81.4	127.2	198.8	286.3	508.9
5.0	22.6	35.3	59.7	90.5	141.4	220.9	318.1	565.5

Flow velocity (m/sec)	Q m ³ /h								
	DN 250	DN 300	DN 350	DN 400	DN 450	DN 500	DN 600	DN 700	DN 800
1.0	176.7	254.5	346.4	452.4	572.6	706.9	1.017.9	6.267.6	12.791.0
1.5	265.1	381.7	519.5	678.6	858.8	1.060.3	1.526.8	9.401.4	19.186.5
2.0	353.4	508.9	692.7	904.8	1.145.1	1.413.7	2.035.8	12.535.2	25.582.0
2.5	441.8	636.2	865.9	1.131.0	1.431.4	1.767.1	2.544.7	15.669.0	31.977.5
3.0	530.1	763.4	1.039.1	1.357.2	1.717.7	2.120.6	3.053.6	18.802.8	38.373.0
3.5	618.5	890.6	1.212.3	1.583.4	2.003.9	2.474.0	3.562.6	21.936.6	44.768.5
4.0	706.9	1.017.9	1.385.4	1.809.6	2.290.2	2.827.4	4.071.5	25.070.4	51.164.0
4.5	795.2	1.145.1	1.558.6	2.035.8	2.576.5	3.180.9	4.580.4	28.204.2	57.559.5
5.0	883.6	1.272.3	1.731.8	2.261.9	2.862.8	3.534.3	5.089.4	31.338.0	63.955.0

Calculated flow (m³/hr) going through a nominal valve-size (DN40= inside dia of Ø40), at different flow velocities

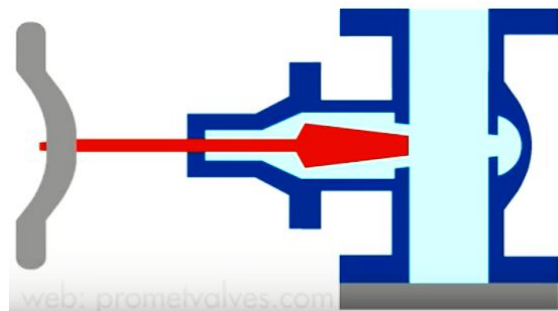
Opening %	K_v							
	DN 40	DN 50	DN 65	DN 80	DN 100	DN 125	DN 150	DN 200
10%	20	15	22	36	64	122	135	293
20%	41	40	53	96	159	238	273	549
30%	63	60	83	148	247	366	461	850
40%	86	85	129	219	359	530	688	1244
50%	118	133	204	351	549	741	1024	1729
75%	240	314	431	722	1094	1527	2335	4033
100%	291	520	606	984	1819	2588	5339	7246

Opening %	K_v								
	DN 250	DN 300	DN 350	DN 400	DN 450	DN 500	DN 600	DN 700	DN 800
10%	383	498	678	886	1121	1384	1994	2713	3544
20%	773	1103	1502	1962	2483	3065	4413	6007	7846
30%	1247	1722	2344	3061	3874	4783	6888	9375	12245
40%	1869	2523	3433	4485	5676	7007	10090	13734	17938
50%	2731	3424	4660	6086	7703	9510	13694	18639	24345
75%	5325	7082	9640	12591	15935	19673	28329	38559	50363
100%	14395	25508	34719	45348	57393	70856	102032	138877	181390

Slika 29. Tehnički dodatak za AVK pločaste zatvarače [28]

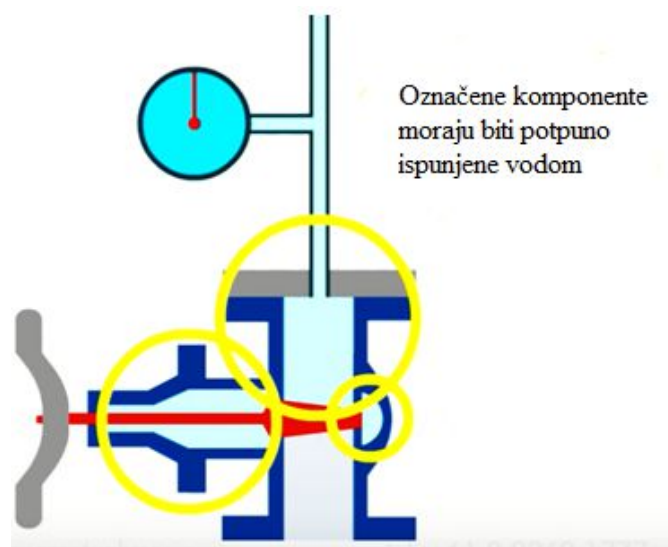
2.4. Ispitivanje vodonepropusnosti zatvarača

Prije uporabe zatvarača, proizvođač zatvarača mora ispitati vodonepropusnost zatvarača. U nastavku je ukratko opisan način ispitivanja propusnosti pločastog zatvarača. Početni položaj pri ispitivanju je potpuna otvorenost zatvarača, te zakrenutost zatvarača na taj način da je os cijevi okrenuta paralelno s smjerom sile gravitacije. Nakon toga slijedi zatvaranje jedne strane cijevi gdje se nalazi zatvarač s vodonepropusnom pločom naslonjenom na prirubnicu, nakon čega je zatvarač potrebno ispuniti vodom kao što je prikazano na slici 30.



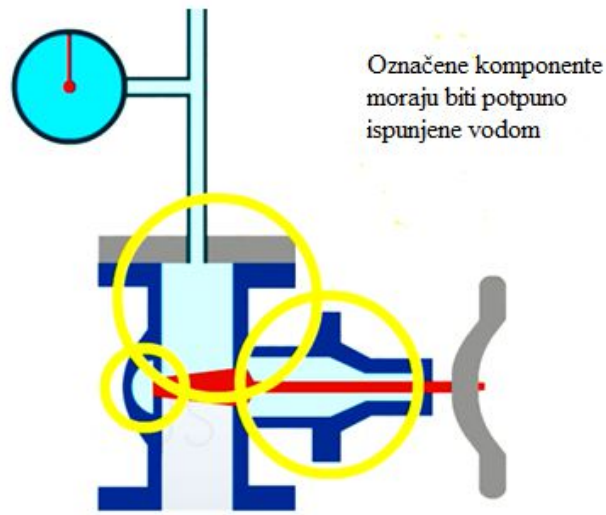
Slika 30. Prvi korak ispitivanja vodonepropusnosti [29]

Sljedeći korak je prislanjanje ploče s manometrom na prirubnicu gornjeg otvora u ovom položaju i nanošenje pritiska od 2,1 MPa u trajanju od 3 minute (Slika 31.). Nakon toga slijedi redom, provjera na vodopropusnost, otpuštanje tlaka, spuštanje pločice zatvarača do stupnja potpune zatvorenosti, te nakon istjecanja fluida s donje strane uklanjanje ploče, te provjera da su sljedeći elementi ispunjeni vodom, kao što je prikazano na slici 31.



Slika 31. Drugi korak ispitivanja vodonepropusnosti (modificirano prema [29])

Nakon toga slijedi ponovo nanošenje pritiska od 1,4 MPa u trajanju od 1 minute, te provjera ležišta na propuštanje vode. Nakon otpuštanja tlaka uklanja se ploča s manometrom i umjesto nje se postavlja vodonepropusna ploča koja je bila na donjem kraju na slici 30. i cijelokupna konstrukcija zatvarača se rotira za 180°. Ponovo se puni i druga strana zatvarača, te se ponavlja isti postupak. Na gornju prirubnicu se postavlja ploča s manometrom, a pomiče se donja vodonepropusna ploča, nakon čega se ponovo provjerava da li su svi dijelovi ispunjeni vodom, odnosno da nije bilo propuštanja kao što je prikazano na slici 32.



Slika 32. Treći korak ispitivanja vodonepropusnosti (modificirano prema [29])

Sljedeći korak je ponovo nanošenje pritiska od 1,4 MPa u trajanju od 1 minute, popraćena provjerom nepropusnosti ležišta, te nakon otpuštanja pritiska uklanjanjem ploče s manometrom. Finalni korak je pražnjenje zatvarača i vraćanje u početni položaj.

3. PRIMJENA ANSYS PROGRAMSKOG PAKETA

3.1. Općenito o Ansys programskom paketu i tvrtki

Ansys CFX kompjuterski program je jedan od proizvoda napravljen od strane američke kompanije Ansys Inc. Njihovi se programi koriste za dizajn i modeliranje proizvoda, numeričke simulacije koje testiraju čvrstoću i trajnost proizvoda, simulacije temperaturne raspodjele, fluidnih kretanja i elektromagnetskih svojstava, te mnogih drugih komponenti u praksi [30]. Najčešće korišteni Ansysovi proizvodi su Fluent, CFX, HFSS, Maxwell, Simplorer, RedHawk i ANSYS Workbench programski paket koji uključuje oba kompjuterska programa koja su bila potrebna za izradu ovog diplomskog rada, a to su Fluent i CFX. U potpoglavlju 3.3 dano je nešto više riječi u vezi ANSYS Workbencha koji je korišten pri izradi ovog rada.

Razvoj ovakve vrste programskog paketa započeo je kako bi se inženjerima olakšao izračun analiza s ograničenim brojem elemenata, te olakšalo simuliranje rješenja inženjerskih problema i dovelo do brze optimalizacije proizvodnih procesa i proizvoda. Prva komercijalna uporaba ovog programskog paketa je verzija 2.0 puštena u javnost još davne 1971. godine. Naknadnim razvojem operativnih sustava i računalnih komponenata nastavlja se razvoj novijih, poboljšanih i naprednijih verzija Ansys programskog paketa do najnovije verzije 19.1, odnosno 19.2 [31]. Preko 40000 korisnika koristi Ansys računalne programe. Taj broj uključuje 96 industrijskih tvrtki od najboljih 100 industrijskih tvrtki na FORTUNE 500 listi i preko 2400 akademskih institucija diljem planete Zemlje [32]. Ansysov programski paket je trenutno vodeći lider u svijetu u inženjerskoj računalnoj simulaciji. Nudeći najbolji i najširi portfelj numeričkih programa za inženjersku simulaciju, na taj način pomaže u rješavanju najsloženijih projektnih izazova i inženjerski proizvoda koji su ograničeni samo maštom [33]. Na slici 33. su prikazane neke od tvrtki koje koriste Ansysove simulacije kroz proizvodni razvojni proces.



Slika 33. Tvrtnke koje koriste Ansys platformu [33]

Tvrtka je osnovana 1970. godine u SAD-u, a zapošljava gotovo 3000 profesionalaca, od kojih su mnogi stručnjaci i inženjeri doktorskih studija koji se bave analizama s metodom konačnih elemenata, Računalnom dinamikom fluida, elektronikom, poluvodičima, skalpanjem i programiranjem pojedinih algoritama i grafičkom i strukturnom optimizacijom dizajna. Osoblje tvrtka omogućuje kupcima širom svijeta da sprovedu svoje koncepte dizajna u uspješne, inovativne proizvode na brži i jeftiniji način. Ansys je prepoznat kao jedna od najinovativnijih svjetskih tvrtki po prestižnim publikacijama kao što su Bloomberg Businessweek i FORTUNE magazin. Globalno sjedište tvrtke nalazi se u Canonsburgu (južno od Pittsburgha), Slika 34.

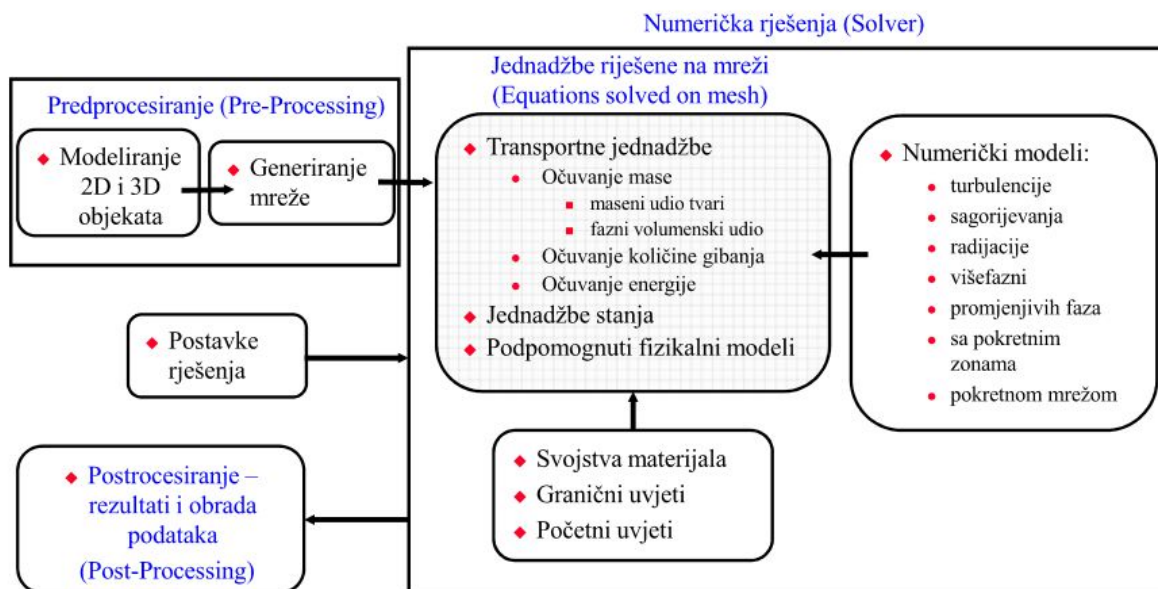


Slika 34. Globalno sjedište tvrtke Ansys u Canonsburgu [34]

3.2. Računalna dinamika fluida (*eng. CFD*)

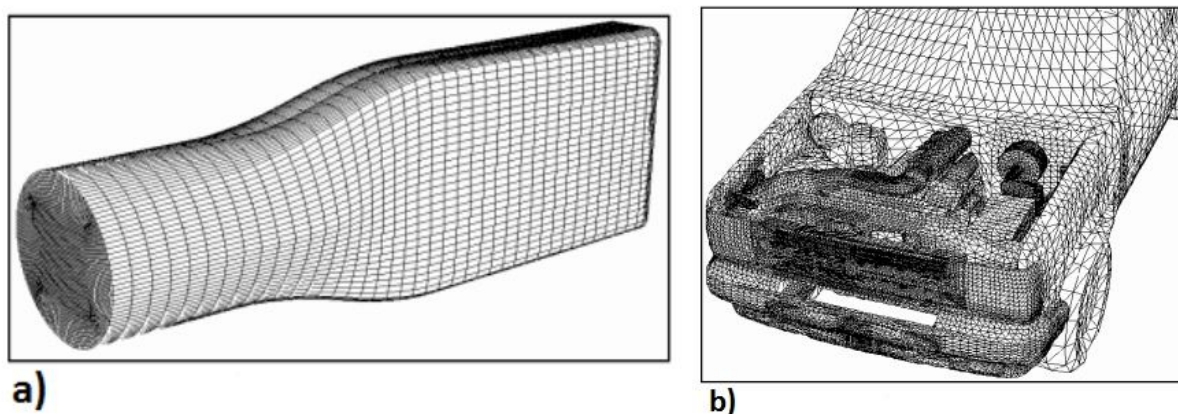
Računalna dinamika fluida (*eng. Computation Fluid Dynamics, CFD*) je znanost predviđanja strujanja fluida, prijenosa topline, prijenosa mase, kemijskih reakcija i srodnih pojava rješavanjem matematičkih jednadžbi koje predstavljaju fizikalne zakone, koristeći numerički proces. Rezultati CFD analiza služe za konceptualne studije novih dizajna, detaljan razvoj proizvoda, rješavanje problema i redizajn. CFD analize smanjuju ukupno uloženo vrijeme i napor potreban za rad u laboratoriju. Prvi korak rada je identifikacija problema i predprocesiranje (*eng. Pre-Processing*) koje uključuje definiranje ciljeva numeričkog modeliranja, definiranje domene koja će se modelirati i konceptualnu izradu mreže. Sljedeći korak je izbor i izvršavanje numeričkog rješenja (*eng. Solver Execution*) koji uključuje postavljanje numeričkog modela i izračunavanje i praćenje (analiziranje) rješenja. Posljednji

korak je naknadna obrada rezultata (*eng. Post-Processing*) koji uključuje pregled i obradu rezultata, te razmatranje i analizu revizije modela [33]. Pregled modeliranja u Računalnoj dinamici fluida (CFD) prikazan je na slici 35.



Slika 35. Pregled modeliranja u Računalnoj dinamici fluida [33]

Prilikom definiranja ciljeva modeliranja potrebno je prepoznati i iskoristiti pojednostavljujuće pretpostavke, definirati potreban stupanj točnosti i slično kako bi se dobili što precizniji rezultati za provedenu analizu. Kod izrade mreže je bitno pravilno odlučiti hoće li se koristiti kvadrilateralna/heksagonalna mreža, trokutna/tetraedarska ili hibridna mreža što ovisi o složenosti geometrije i strujanju. Osim toga je potrebno odrediti stupanj razlučivosti mreže i definirati koliki je broj ćelija potreban. Za jednostavne geometrije kvadrilateralne/heksagonalne mreže mogu pružiti visoko kvalitetna rješenja s manje ćelija nego usporediva trokutna/tetraedarska mreža, dok je kod složenih geometrija preporučljivo koristiti mreže s trouktnim/tetraedarskim elementima mreže zbog numeričke prednosti i kraćeg vremena za generiranje mreže. Izgledi kvadrilateralne i trokutne mreže prikazani su na slici 36.



Slika 36. Izrada mreže elemenata kod Računalne dinamike fluida [33]

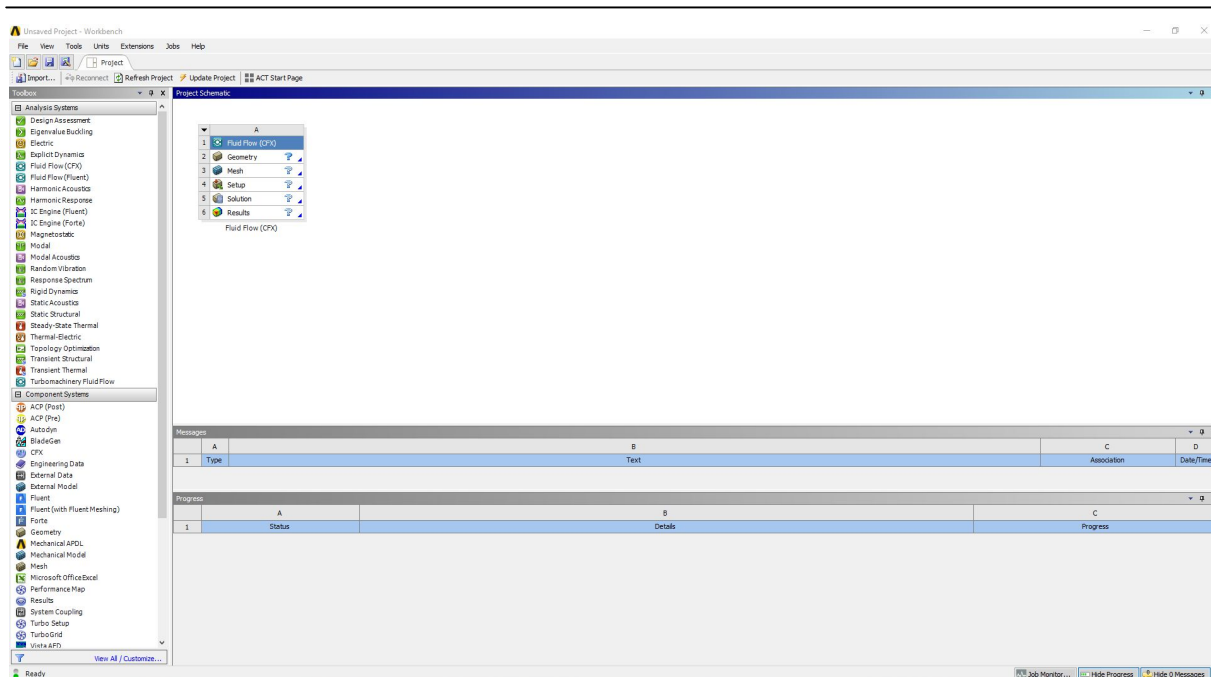
a) kvadrilateralna mreža b) trokutna mreža

Korak postavljanja numeričkog modela uključuje odabir odgovarajućih fizikalnih modela, određivanje svojstva materijala za fluide, kruta tijela i mješavine, određivanje uvjeta rada, rubnih uvjeta na gračnim zonama, osiguranje početnog rješenja, postavljanje kontrole rješenja i postavljanje konvergencije praćenja rješenja. Nakon izračunavanja i analiziranja rješenja slijedi pregled i obrada rezultata. Ispitivanje rezultata je nužno kako bi se osiguralo očuvanje svojstava i ispravnog fizikalnog ponašanja [33].

3.3. Studentska verzija ANSYS Workbench programskog paketa

Studentska verzija ANSYS Workbench programskog paketa je besplatna, ali za razliku od komercijalne verzije Workbench programskog paketa ograničena je brojem strukturalnih čvorova/elementa na 32000 kod mehanike krutih tijela, odnosno na 512000 elementa u području Mehanike fluida. Prilikom izrade mreže i proračuna utvrđeno je da kod studentske verzije Ansys CFX kompjuterskog programa postoji mogućnost generiranje domene problema i iznad spomenutih 512000 elementa, pa je u daljnjem radu korišteno i do 750000 elementa zbog dobivanja gušće numeričke mreže, samim time i preciznijih rezultata.

U studentskoj verziji Workbencha 19.1 između ostalog je uključen i ANSYS SpaceClaim, ANSYS DesignModeler kao osnovni programi za definiranje geometrije objekta i domene proračuna. Slikom 37. prikazano je početno sučelje ANSYS Workbencha s započetim samostalnim sustavom čiji se proračun bazira na ANSYS CFX kompjuterskom programu.



Slika 37. Radno sučelje ANSYS Workbench 19.1 programskog paketa

Osim Fluid Flow aplikacije/programa za sustav analize programski paket ANSYS Workbench 19.1 uključuje i ostale aplikacije za sustave analize u području reološkog modeliranja, elektrotehnike, magnetizma, elektromagnetizma i slično. Pri tome se u samom programu pojavljuju različiti moduli koje korisnik proizvoljno bira po potrebi, a neki od najznačajnijih su: električni, eksplicitno dinamički, magnetostatični, statički strukturalni, tranzijentni strukturalni, termalno električni, modalni i ostali, kao što je vidljivo u lijevom izborniku unutar radnog sučelja na slici 37.

Za proračun i hidrauličku analizu u ovom je diplomskom radu korišten ANSYS CFX kompjuterski program koji je vrlo sličan sa ANSYS Fluent kompjuterskim programom. Oba sustava za rješavanje problema iz domene Mehanike fluida su kvalitetna i približno daju jednake točnosti, a razlika većinom ovisi o fizikalnom procesu koji se promatra, te znanju i razumjevanju rada u pojedinom kompjuterskom programu. Neke od temeljnih razlika ova dva kompjuterska programa za rješavanje problema su sljedeći:

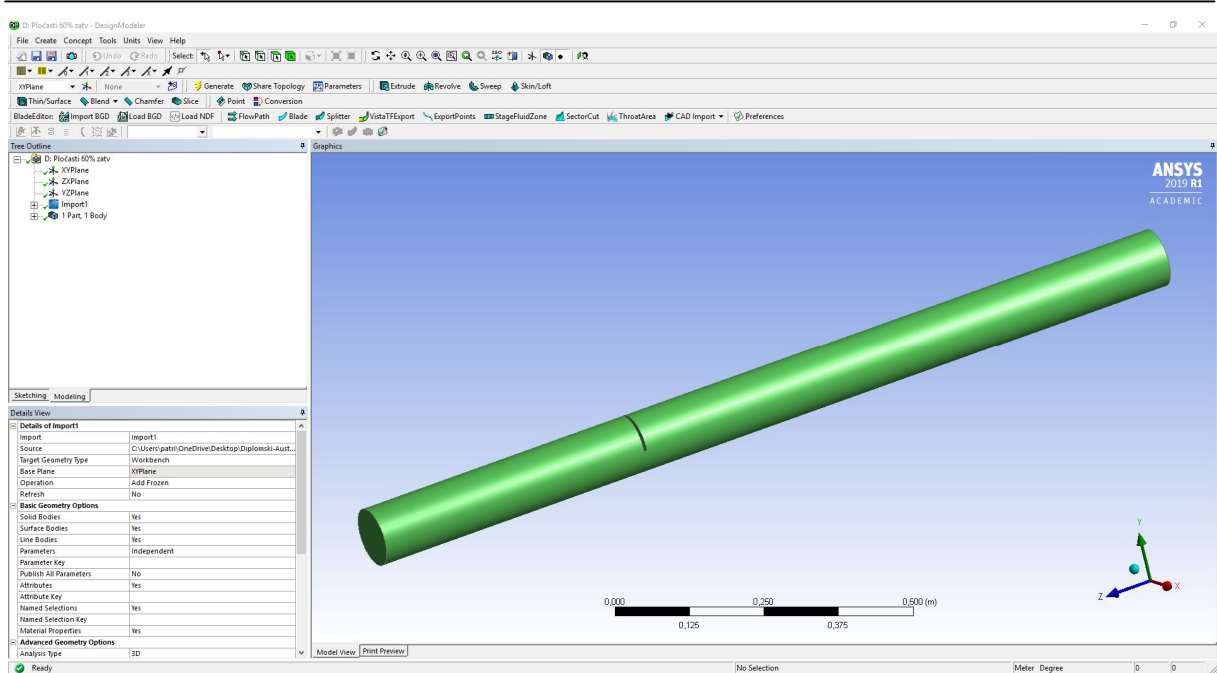
- ANSYS CFX program nije primjeren za 2D modele, dok ANSYS Fluent kompjuterski program može obavljati proračune za 2D jednako kao i za 3D probleme [35].
- Program Fluent koristi pristup centriranih ćelija, dok CFX program koristi vršno centrirani pristup. Temeljem spomenutog, Fluent može računati poliedarsku mrežu, dok je CFX bolji za tetraedarsku i heksaedarsku mrežu [35].

- CFX program se koristi s već ugrađenim programom CFD-postom za postprocesiranje unutar Ansys kompjuterskog paketa, dok je kod Fluent programa potreban dodatan kompjuterski program za postprocesiranje što može biti kompleksno za osobe koje nemaju dovoljno iskustva u radu s Ansysovim programskim paketom [35].
- Sposobnost prilagodbe generiranja mreže, odnosno izradi numeričke mreže točaka je lošija kod CFX programa. U CFXu prilagodba „meshiranja“ je moguća jedino za samostalne domene i limitirane fizikalne vrijednosti [35].
- Ubrzanje obrade simulacije s GPUom (grafička procesorska jedinica ili grafički čip, eng. *Graphics Processing Unit*) je moguće u ANSYS Fluentu, ali ne i u ANSYS CFX kompjuterskom programu [35].

Za modele pločastog i leptirastog zatvarača koji nemaju veoma kompleksni oblik nije potrebno korištenje ANSYS Fluenta jer je izračun i provođenje numeričke simulacije provedeno relativno brzo. Oba kompjuterska programa imaju ograničenja koja se razlikuju ovisno o modelima, dok je ANSYS Fluent preporučljivo koristiti kod supersoničnih i hipersoničnih strujanja fluida zbog veće točnosti u usporedbi s ANSYS CFX programskim sustavom rješavanja [35].

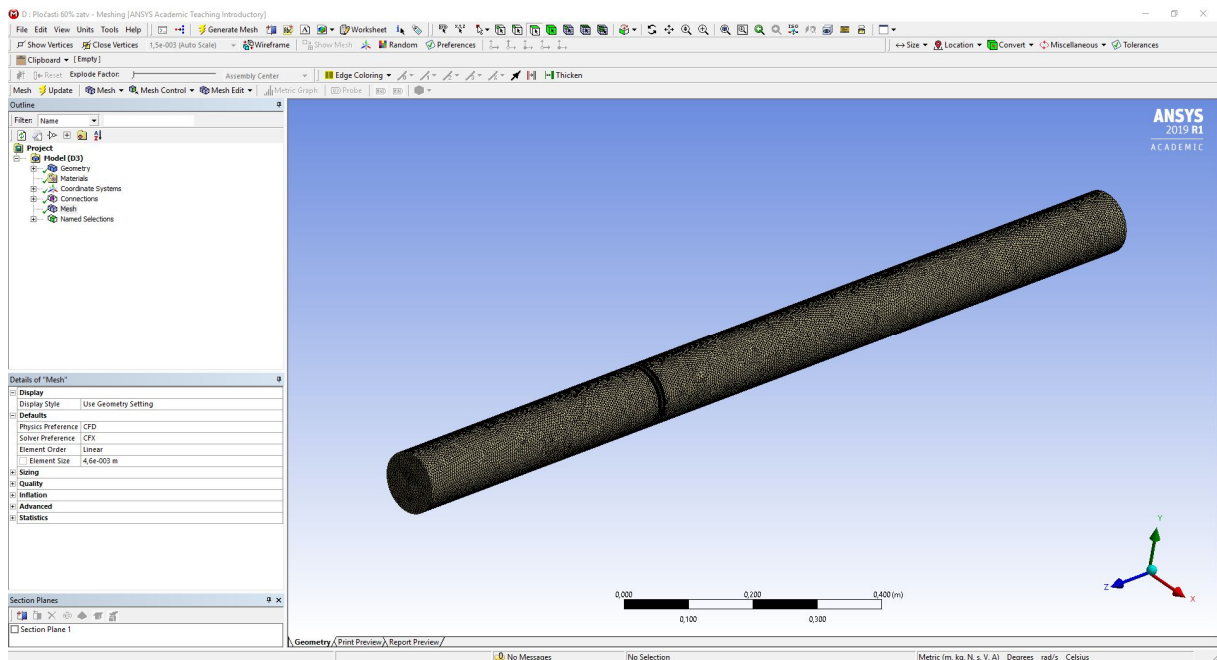
DesignModeler (DM) je komponenta ANSYS Workbencha koja je korištena tokom ovog rada (Slika 38.). To je program za modeliranje sličan AutoCAD programima s ciljem mogućnosti modificiranja geometrije za simulaciju kao što su pojednostavljenje značajki, planarna ekstrakcija tijela, dijeljenje površina, operacije sa ispunama na površinama i slično. Sadrži mogućnost parametarskog modeliranja, a integrira se izravno s ANSYS Workbench modulima [33]:

- Simulation
- CFX-Mesh
- Advanced Meshing
- DesignXplore
- BladeModeler.



Slika 38. Radno sučelje DesignModeler programa

CFX-Mesh je program unutar Workbench programskog paketa koji je dizajniran za generiranje CFD mreže za ANSYS CFX numeričko rješenje (Slika 39.). Čvrsto je povezan s DesignModeler programom i omogućuje jednostavan korisnički unos parametara, sposobnost generiranja velikih složenih mreža. Potrebno je spomenuti kako pruži mogućnost napredne kontrole mrežnog poboljšanja.



Slika 39. Radno sučelje CFX-Mesh programa

3.4. Ansysov programski paket i njegova primjena

ANSYS program za dinamiku fluida je vrlo precizan, ima najbrže vrijeme rješavanja u usporedbi s ostalim programskim paketima na tržištu, prilagodljiv je za razne vrste potreba, parametriziran za optimizaciju proračuna, omogućuje multifizikalne procese, a ANSYS tehnička podrška pomaže u rješavanju izazovnih i složenih simulacija [33].

Ansys Fluent nudi najširi raspon mogućnosti modeliranja za pojave aerodinamike, izgaranja fluida, hidrodinamike, mješavina tekućina i plinova (u interakciji sa krutim tijelom), disperzije čestica i slično. Prilagodljiv je za proširenje mogućnosti na specifične CFD potrebe, uključujući korisnički odabrana svojstva materijala i simulacijske modele. Koristi se kod vanjskih/unutarnjih strujanja oko automobila i strujanja u cilindru, aerodinamike s velikim brzinama strujanja, raketnih strujanja, kemijskih reaktora, analiza strujanja sa mjehurićima, buka uzrokovanih strujanjem i sličnih pojava [33].

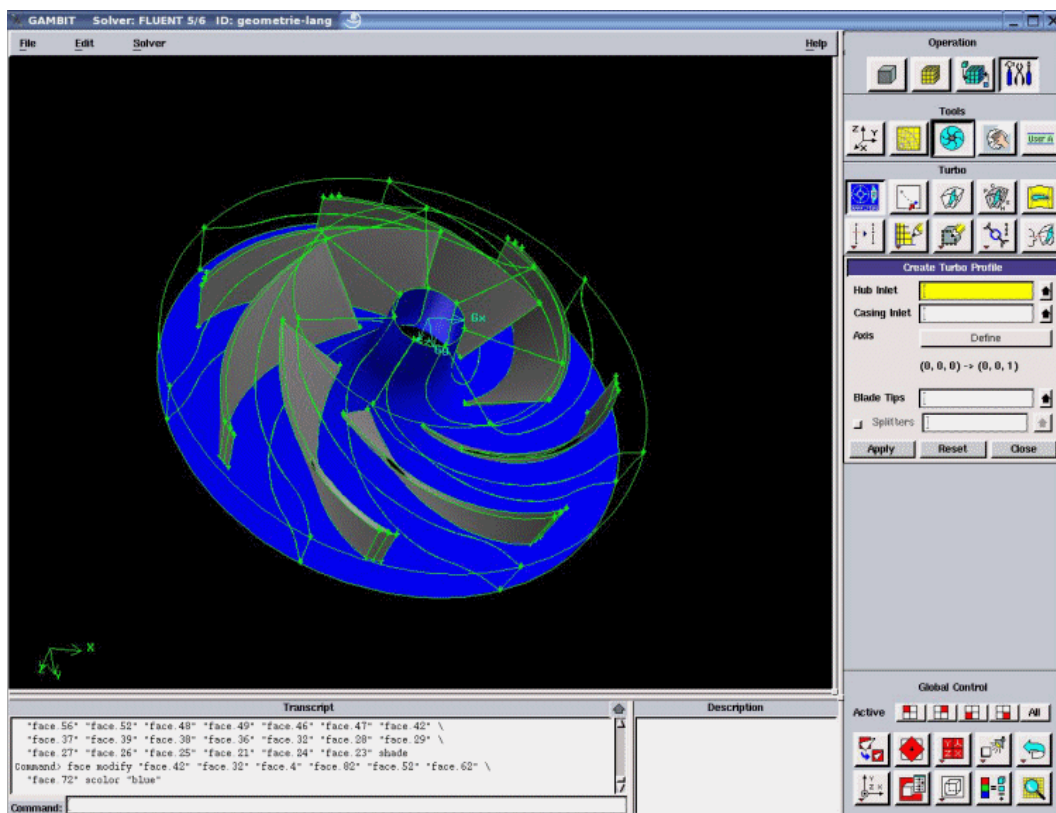
Ansys CFX ima prilagođene mogućnosti za predviđanje performansi rotirajuće opreme turbostrojeva i kontinuirane inovacije za simuliranje izazovnih aplikacija i fenomena (na primjer predviđanje podrhtavanja lopatica). Program ima najpouzdaniju konvergenciju, zbog toga što nema potrebe za stalnim nadgledavanjem [33].

Osim spomenutih Ansysovih programa, CFXa i Fluenta postoje sljedeći programi [33]:

- Polyflow, koji služi za rješavanje laminarnih i viskoznih strujanja metodom konačnih elemenata.
- Fluent za CATIA V5, koji donosi CFD analizu u CATIA V5 okruženje nudeći potpunu generativnu asocijativnost između geometrije i CFD modela.
- Gambit, jednostavan integrirani predprocesor za CFD analizu koji služi za kreiranje geometrije, generiranje mreže, ispitivanje kvalitete mreže i dodjeljivanje graničnih zona. Njegovo je sučelje prikazano na slici 40.
- Tgrid predprocesor za generiranje mreže pomoću tetraedarskih/hibridnih elemenata.
- IcePak, fokusiran na proračune i simulacije hlađenja elektroničkih naprava kao što su strujanje rashladnog zraka, provođenje topline, konvekcija i prijenos topline zračenjem. Prilagođen je za dizajniranje kabina i raznih zatvorenih prostora, položaja ventilatora, procjenu toplinskog gibanja i disipacije energije.
- AirPak program koji pojednostavljuje projektiranje i analizu ventilacijskih sustava. Služi kao precizan, brz i jednostavan alat za dizajn koji osposobljava dizajnere i

stručnjake bez velikog iskustva u računalnim aplikacijama. Služi za optimizaciju dizajna ili određenih problema na temelju točnih predviđanja uzoraka strujanja zraka, toplinskih uvjeta, uvjeta udobnosti i/ili učinkovitosti kontrole kontaminacije.

- MixSim specijalizirano korisničko sučelje koje omogućuje brzo i jednostavno podešavanje simulacija u spremnicima za miješanje fluida.
- FloWizard je prvi CFD proizvod opće namjene za nestručnjake koji rade u Fluent i Gambit programima. Njegov je fokus usredotočen na jednostavnost korištenja i automatizaciju. Koristi se u osnovnim proračunima strujanja i prijenosa topline.

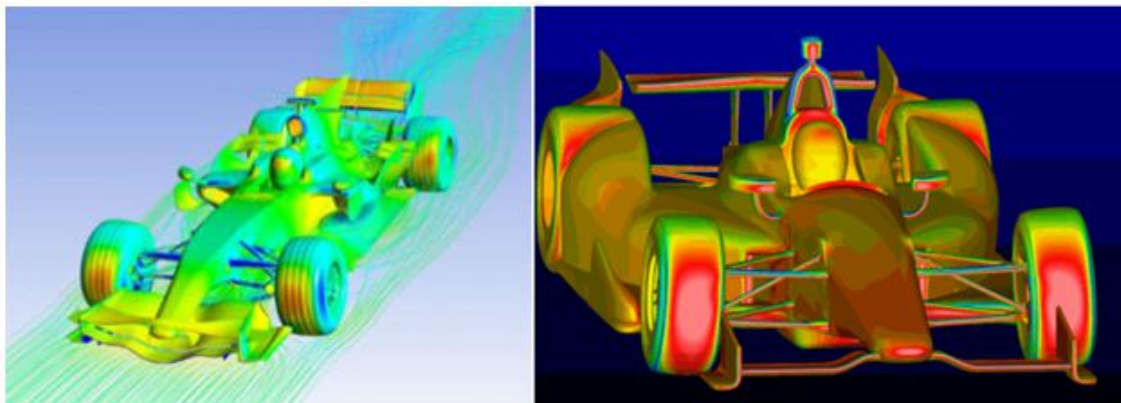


Slika 40. Radno sučelje programa Gambit [36]

U nastavku su dani primjeri primjene ANSYS programskog paketa u raznim poljima u kojima se koriste kroz praksu [33]:

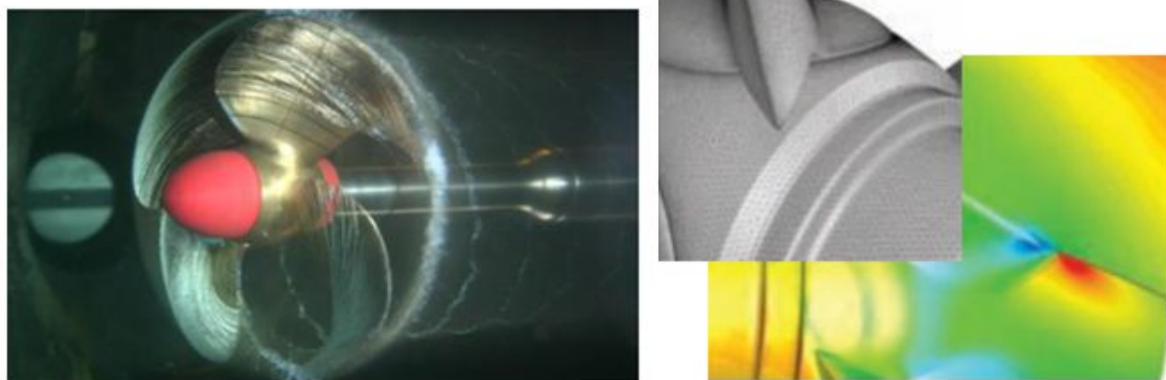
- Aerodinamička optimalizacija primjer primjene: smanjenje trenja trkačkog bicikla, za koje uz pomoć ANSYSa dobiveno točno predviđanje uzorka trenja i strujanja oko trkačkog bicikla i omogućena sposobnost proučavanja pojedinih komponenti bicikla koja su prednje vilice, kotači amortizeri i slično. Testiranja su potvrdila da su bicikli dizajnirani s ANSYS programom isporučili model bicikla s 20% manje otpora nego prethodni modeli.

- Aerodinamička optimizacija – primjer primjene: optimiziranje aerodinamike Formule 1. Uz uporabu Ansysa je moguće točno predvidjeti silu trenja, silu uzgona i strujanje (Slika 41.) oko trkaće Formule 1. Postupak je proveden za tvrtku Red Bull Racing.



Slika 41. Predviđanje opstrujavanja zraka (lijevo) i opterećenja fluidom (desno) za Formulu 1 [33]

- Izgradnja aerodinamičkih performansi – primjer primjene: izgradnja nogometnog stadiona. Cilj je predvidjeti simuliranje vjetra i kiše oko stadiona na temelju čega je moguće odrediti najbolji dizajn za gledatelje. Uz pomoć Ansys računalnog programa dobiveno je cjelovito rješenje za spomenuto simuliranje, na temelju čega su uspoređene razne varijante i odabrano optimalno rješenje. Ovakva studija pokazuje da CFD može pružiti detaljne uvide u obrasce strujanja vjetra i raspodjelu kiše pod utjecajem vjetra u odnosu na raspon i konfiguraciju stadiona.
- Hidrodinamička optimizacija – primjer primjene: povećanje učinkovitosti propelera kako bi se sprječila pojava kavitacije koja uvelike smanjuje učinkovitost brodskih propelera. Cilj je uz pomoć Ansysa točno predviditi uzorak strujanja oko propelera. Pretpostavka na kraju simulacije daje podataka kako bi se učinkovitost trebala povećati s 1% na 1,5% što je naizgled malo, ali ima potencijal smanjiti troškove goriva za nekoliko milijardi dolara ukoliko se primjeni na sve trgovačke flote. Simulacija učinkovitosti propelera prikazana je na slici 42.



Slika 42. Simulacija učinkovitosti propelera primjenom Ansys računalnih programa [33]

- Smanjenje gubitaka tlaka – primjer primjene: smanjenje gubitaka izazvanih turbulentnim strujanjem. Cilj je uz pomoć primjene Ansys programa smanjiti gubitke tlaka u ventilu i povećati vrijeme uslijed potpuno otvorenog ventila u uvjetima niskog strujanja. Uz pomoć Ansysovog programskog paketa postoji mogućnost modeliranja različitih položaja ventila, od potpuno otvorenog do potpuno zatvorenog slučaja.
- Optimiziranje sustava hlađenja – primjer primjene: osiguranje odgovarajućeg hlađenja. Uz pomoć Ansys programa precizno se simuliraju složena strujanja i miješanja tople i hladne vode.
- Opterećenje valova – primjer primjene: pomorska hidraulika kod koje je cilj testirati dizajn ispod vanobalnih konstrukcija pri različitim uvjetima valova i točno predividiti sile izazvane valovima. Uz programiranje u Ansys paketu moguće je odrediti točan volumen modeliranja tekućine, riješiti složene geometrije obale i simulirati različite valne režime. Prikaz simulacije velikih valova na strukturu daleko od obale dan je na slici 43.



Slika 43. Simulacija velikih valova na konstrukciju platforme daleko od obale [33]

- Predviđanje korozije u cjevovodu – Korozija i erozija u cjevovodima zbog višestrukog strujanja može rezultirati neuspjelim proizvodnjom, izgubljenim proizvodom i oštećenjem okoliša. Koristi se Ansys Fluent i UDF za određivanje raspodjele brzine i koncentracije tvari kao i raspodjela brzine korozije. Na temelju analize stvorena su dva različita korozijska modela. Ukoliko se doda sredstvo za čišćenje, korozija bi se dodatno smanjila u modelu.

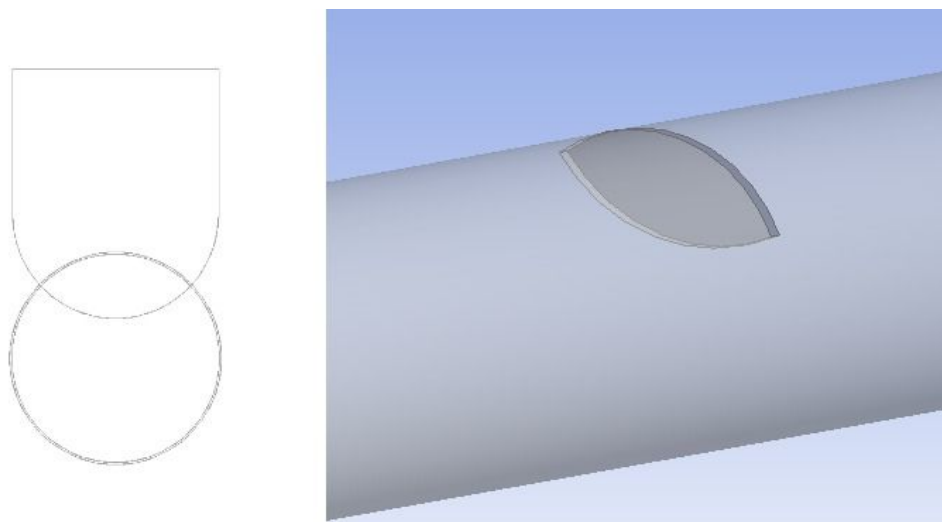
4. NUMERIČKI MODELI ZA HIDRAULIČKU ANALIZU OPSTRUJAVANJA FLUIDA OKO TABLASTIH I LEPTIRASTIH ZATVARAČA

4.1. Izrada modela i generiranje objekata vodoopskrbnog sustava

U ovom je poglavlju diplomskog rada opisana izrada numeričkog modela pločastog i leptirastog zatvarača primjenom Ansysovog programskog paketa uz pomoć kompjuterskog programa Ansys CFX, definiranje vodoopskrbne cijevi i objekta (zatvarača) oko kojeg se vrši opstrujavanje fluida.

4.1.1. Izrada modela pločastog zatvarača i generiranje objekata vodoopskrbnog sustava

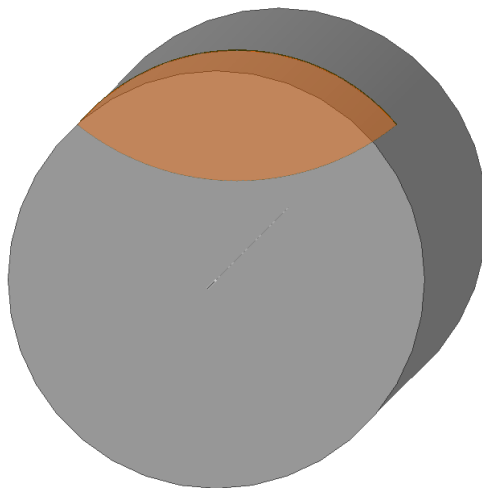
Pločasti 3D geometrijski model je izrađen u programu Autocad 2016 za početnu poziciju od 20% zatvorenosti (80% otvorenosti), što znači da zatvarač sjeće, tj. zatvara površinu od 20% u protočnom profilu na poziciji na kojoj se nalazi. Vodoopskrbna cijev predviđena za korištenje pri modeliranju je promjera 100 mm, dok debljina prirubnice cijevi i debljina zatvarača iznose 1 mm. Odabran je ovaj promjer cijevi iz razloga što je studentska verzija Ansys programskog paketa ograničena brojem čvorova i elemenata, pa se zbog toga kod manjih numeričkih modela dobije preciznija numerička mreža točaka. Dio zatvarača koji se nalazi izvan cijevi je zanemariv iz razloga što u tom dijelu nema fluida, pa je samim time i izrada numeričke mreže točaka za dio zatvarača izvan cijevi nepotrebna. To olakšava izradu numeričkog modela zatvarača, jer nije potrebna kompleksna izrada dijela zatvarača izvan cijevi. Protočna površina kod početnog pločastog modela sa stupnjem zatvorenosti od 20% iznosi 0,0063 m². Na slici 44. je prikazan model pločastog zatvarača izrađen u programu Autocad 2016, odnosno konture u 2D prikazu. Gornji dio predstavlja konstrukciju zatvarača, dok donji predstavlja vodoopskrbnu cijev, a presjecište dio zatvarača koji zatvara tok na 20% vodoopskrbe cijevi.



Slika 44. 2D i 3D prikaz pločastog zatvarača i cijevi izrađenih u Autocadu 2016 i DesignModeler programu

Prilikom ubacivanja 3D geometrijskog modela u dwg. formatu u studentskoj verziji Ansys Workbench CFX 19.1 kompjuterskog programa utvrđeno je da verzija ne podržava ubacivanje formata iz Autocad 2016 programa. Ovaj je problem prisutan jedino kod studentske verzije Ansys programskog paketa. Ubacivanje geometrije modela i definiranje geometrije unutar Ansys programskog paketa može se obaviti u posebnim programima kao što su SpaceClaim ili DesignModeler koji su temeljni dodaci ukomponirani unutar samog programskog paketa. Izrađene modele je potrebno prebaciti u jedan od prihvatljivih formata. Koristeći besplatan kompjuterski program ABViewer 14 modele je moguće prebaciti u STEP format koji je jedan od najčešće korištenih formata za prikaz i importiranje 2D i 3D geometrije modela, pa je isto i napravljeno. Geometrija je ubačena u STEP formatu koristeći SpaceClaim gdje je dalje bilo potrebno precizno definirati završnu geometriju modela. Nakon ubacivanja potrebne geometrije modela, SpaceClaim program za ovaj slučaj prepoznaje dvije komponente, vodoopskrbnu cijev i zatvarač zasebno. Kako bi se geometrija modela definirala potrebno je imati jedan element, odnosno komponentu koja predstavlja sve granične konture sustava. Uklanjanjem dijela zatvarača koji se nalazi izvan vodoopskrbne cijevi, i izrezivanjem dijela cijevi gdje ju zatvarač sjeće dobivaju se završne konture sustava, odnosno završna geometrija. Prije prelaska na sljedeći korak potrebno je provjeriti da cjelokupni model bude definiran kao „solid“, jer ukoliko to nije zadovoljeno program završni geometrijski model definira kao šuplji prostor, zbog čega bi pri generiranju mreže, mrežu dobili jedino na konturama vodoopskrbne cijevi i zatvarača, ali ne i u unutrašnjosti. Konture cijevi i zatvarača vidljive su na slici 45. gdje je vidljiva vodoopskrbna cijev unutar koje je urezan zatvarač, koji zajedno na taj način čine jedan „solid“ (jedno kruto tijelo). Duljina vodoopskrbne cijevi ispred

i iza zatvarača definira se opcijom „pull“, čime se dimenzija cijevi mijenja u željenom smjeru. Iz razloga ograničenosti brojem elemenata i čvorova za početni model s 20% zatvorenosti nije uzeta velika duljina cijevi, već duljina od 820 mm (300 mm ispred zatvarača, 520 mm iza zatvarača gledajući u smjeru toka fluida) iz razloga što su promjene veće i dulje po rasponu iza pločastog zatvarača.



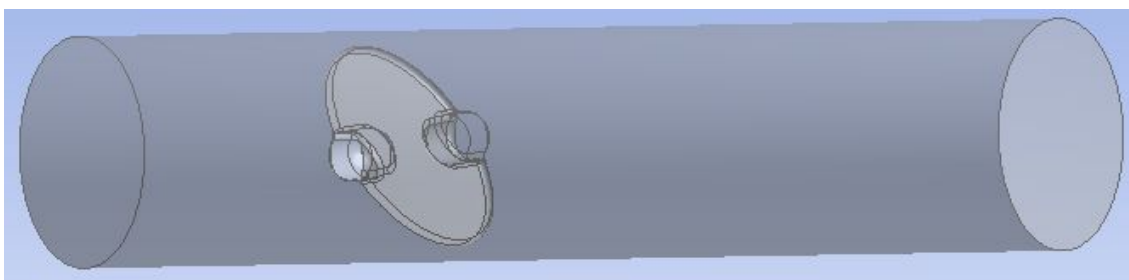
Slika 45. Završna 3D geometrija 20% zatvorenog pločastog zatvarača unutar SpaceClaim programa

4.1.2. Izrada modela leptirastog zatvarača i generiranje objekata vodoopskrbnog sustava

Leptirasti 3D geometrijski model je izrađen u SolidWorks programu za početnu poziciju od 30° otvorenosti u odnosu na vertikalnu os modela (Slika 46.). Leptirasti je zatvarač kompleksnije geometrije od pločastog, pa iz tog razloga nije napravljen u Autocad 2016 programu. Sam zatvarač sastoji se od 46 elemenata, i varijabilne je debljine. Promjer cijevi za dimenzioniranje iznosi 100 mm iz jednakog razloga kao i kod pločastog zatvarača, kako bi se dobila gušća numerička mreža s obzirom na ograničenja studentske verzije Ansys Workbench CFX 19.1 kompjuterskog programa.

Geometrija 3D modela je ubačena u STEP formatu koristeći DesignModeler program gdje je dalje potrebno precizno definirati završnu geometriju modela. SpaceClaim program za ovaj slučaj prepoznaje veliki broj komponenti, 64 komponenti zatvarača i vodoopskrbnu cijev. Iz tog je razloga za leptirasti zatvarač korišten DesignModeler program za definiranje geometrije 3D modela. Kako bi se geometrija definirala potrebno je imati jedan element, odnosno komponentu koja predstavlja sve granične konture sustava/modela. To se kod ove geometrije modela postiže izrezivanjem unutarnjeg dijela leptirastog zatvarača, odnosno

ostavljaju se samo konture koje zajedno s vodoopskrbnom cijevi tvore jednu cjelinu. Prije prelaska na sljedeći korak potrebno je provjeriti da sustav bude definiran kao „solid“, jer ukoliko to nije zadovoljeno program završni cjelokupni model definira kao šuplji prostor, zbog čega bi pri generiranju mreže, mrežu dobili jedino na konturama vodoopskrbne cijevi i zatvarača, ali ne i u unutrašnjosti. Konture cijevi i zatvarača vidljive su na slici 46. gdje je vidljiva cijev unutar koje je urezan zatvarač, koji zajedno na taj način čine jedan „solid“. Duljina vodoopskrbne cijevi ispred i iza zatvarača definira se opcijom „pull“ u SpaceClaim programu, čime se dimenzija cijevi mijenja u željenom smjeru. Iz razloga ograničenosti brojem elemenata i čvorova za početni model leptirastog zatvarača s 30° otvorenosti nije uzeta velika duljina cijevi, već duljina od 760 mm (300 mm ispred zatvarača, 460 mm iza gledajući u smjeru toka fluida) iz razloga što su promjene veće i dulje po rasponu iza leptirastog zatvarača.



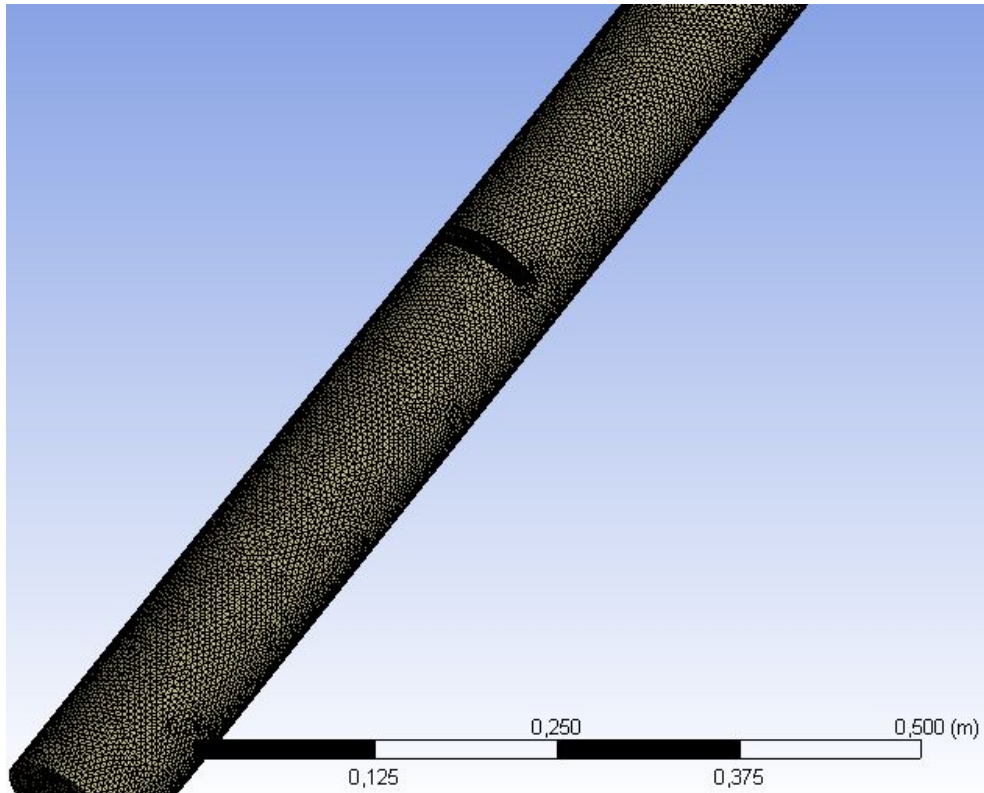
Slika 46. Završni 3D geometrijski model 30° otvorenog leptirastog zatvarača u DesignModeler programu

4.2. Predprocesiranje

Tokom postupka predprocesiranja model se priprema za traženje rješenja za sustav/model analizom konačnih elemenata. Cijela domena je diskretizirana u dijelove koje zovemo elementi. Elementi formiraju blok za koji je potrebno definirati rubne i početne uvijete, te vanjske utjecaje [37]. Postupak predprocesiranja sastoji se od 3 glavna koraka, izrade geometrije modela, definiranja materijala od kojih se model sastoji i „meshiranja“, odnosno generiranja mreže elemenata. Geometrija može biti jednodimenzionalna, dvodimenzionalna ili trodimenzionalna. Prilikom njene izrade potrebno je paziti da se olakša izrada mreže elemenata, iako to nije nužno. Nakon izrade geometrije modela potrebno je definirati materijale za svaki element. Najčešći način je automatsko generiranje mreže uz kontrolu kvalitete same mreže. Prilikom izrade numeričke mreže moguće je odrediti određeni broj elemenata u specifičnom području ili zadati programu da veličina elemenata bude

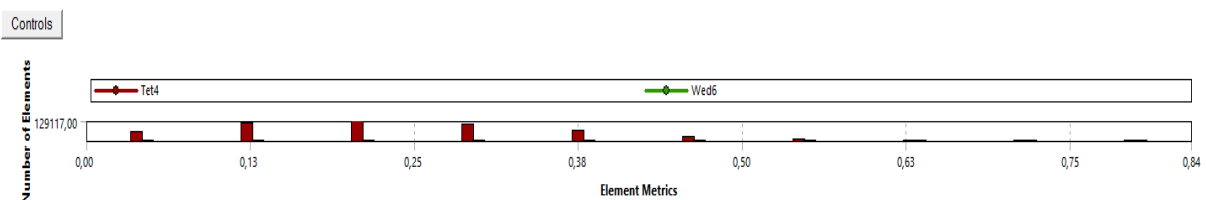
jednake veličine na nekom dijelu modela. Pojedini oblici elemenata i veličine nisu preporučljive za fazu procesiranja, pa Ansys CFX kompjuterski program daje upozorenje ukoliko dođe do toga. Izrada numeričke mreže zadovoljavajuće kvalitete za dobivanje rezultata s dovoljnim stupnjem točnosti ovisi o korisniku [38].

Za izradu numeričke mreže može se koristiti nekolicina kompjuterskih programa poput Hypermesha, Medina, ICEM i ostalih [37]. Za generiranje mreže modela leptirastih i pločastih zatvarača korišteno je generiranje mreže elemenata ugrađeno unutar Ansys CFX kompjuterskog programa. Nakon generiranja mreže potrebno je provjeriti pogreške, povezanost i kvalitetu same numeričke mreže čime osiguravamo dobivanje smislenog rezultata u procesiranju. Neke od osnovnih provjera elemenata su trodimenzionalni heksahedralni element, trodimenzionalni tetraedarski element i ljuskasti element [37]. Prije generiranja numeričke mreže imenovane su sve konture/elementi budućeg modela, ulazni profil, izlazni profil, stijenka cijevi i zatvarač (svi elementi u domeni modela moraju biti striktno definirani). Za zatvarač je zadana programski kontrolirana infleksija, odnosno zadano je da u području zatvarača numerička mreža bude drugačijeg oblika i gušća radi preciznijih rezultata u području samog zatvarača. Nakon generiranja numeričke mreže za provjeru njene kvalitete korištena je provjera asimetričnosti. Provjera asimetričnosti provjerena je za numeričke mreže svih varijanti pločastih i leptirastih zatvarača i predstavlja udaljenost između centra lica i centra veze dva susjedna elementa. Ako su ta dva centra u istoj točki asimetričnost iznosi 1,0 što je najgore moguće za mrežu. Što je asimetričnost manja to je udaljenost između centara veća, i numerička mreža je veće kvalitete. Za prvi stupanj otvorenosti pločastog zatvarača od 20% prosječna asimetričnost iznosi približno 0,23, a najveća 0,84 uzevši u obzir da je blizu maksimuma vrlo malen broj elemenata. Kod ovakve provjere bitno je provjeriti najveću asimetričnost, jer bi veliki broj elemenata s velikom asimetričnošću mogao onemogućiti dobivanje preciznih rezultata (iako Fluent i CFX kompjuterski programi veoma dobro rješavaju i takve elemente). Na temelju pregleda numeričke mreže i provjere asimetričnosti odlučeno je da dobivena mreža prikazana na slici 47. za ovu geometriju modela zadovoljava, te se moglo preći na sljedeći postupak, odnosno procesiranje.



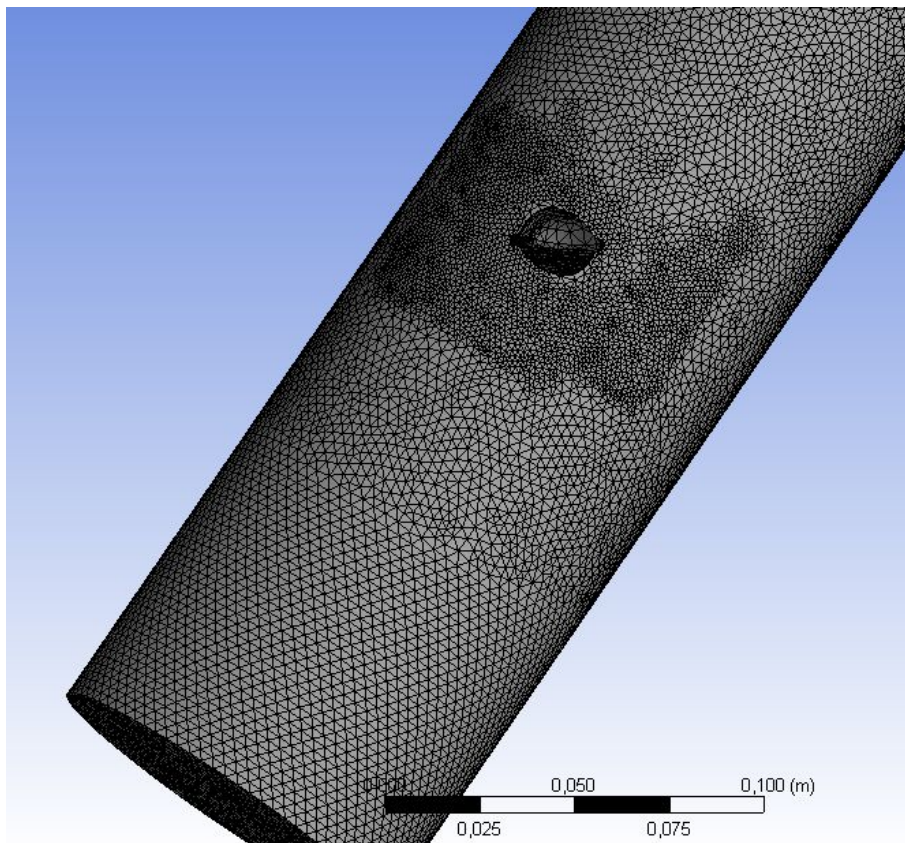
Slika 47. Numerička mreža dobivena za pločasti zatvarač s 20% zatvorenosti

Mreža na slici 47. se sastoji od 101205 čvorova i 502984 elemenata. Na slici 48. prikazana je raspodjela asimetričnosti kao povjera kvalitete numeričke mreže za spomenuti model zatvarača.



Slika 48. Provjera asimetričnosti za numeričku mrežu pločastog zatvarača s 20% otvorenosti

Osim spomenute provjere kvalitete numeričke mreže koriste se provjera kvalitete elemenata, provjera omjera stranica za trokut, prizmu i tetraedar, Jacobijanski omjer odnosno „Jacobian“ koji predstavlja odstupanje elementa od savršeno oblikovanog elementa, paralelno odstupanje, faktor izvijanja, karakteristična duljina elementa i slično. Na slici 49. prikazana je mreža elemenata za model leptirastog zatvarača s otvorenosti od 30° koja se sastoji od 95609 čvorova i 455230 elemenata za koju je također obavljena provjera asimetričnosti čiji prosjek iznosi 0,255 nakon čega je moguć prelazak na postupak procesiranja.

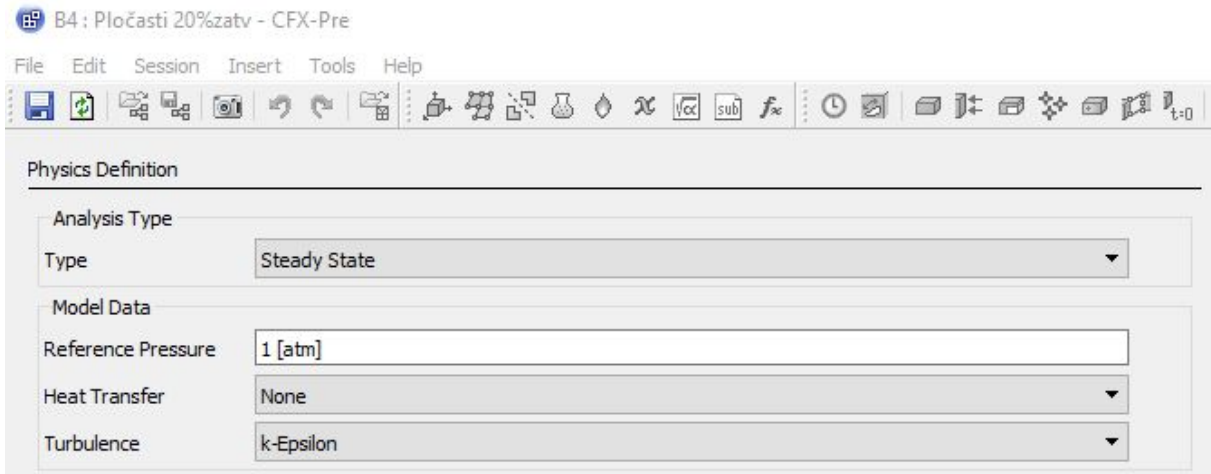


Slika 49. Mreža elemenata dobivena za leptirasti zatvarač s otvorenosti od 30°

4.3. Definiranje fizikalnih parametara u numeričkom modelu

Prije početka samog procesiranja potrebno je definirati fizikalne parametre za pojedini numerički model/podmodel nakon generiranja mreže elemenata. Ovaj korak također spada pod predprocesiranje i uključuje definiranje ulaznih varijabli i njihovih vrijednosti, definiranje tipa modela, definiranje dinamičke i kinematičke viskoznosti, te rubnih i početnih uvijeta. Za definiranje parametara korišten je „*quick setup mode*“ za sve varijante modela pločastih i leptirastih zatvarača. Odabran je „*Single phase*“ problem što označava da je u problemu definirana prisutnost samo jednog fluida, a to je u ovom slučaju voda. U sljedećem koraku odabrana je voda s temperaturom od 25 °C za koju Ansys CFX kompjuterski program već ima definirana svojstva u bazi podataka, pa ih nije potrebno dodatno unositi. Naravno, u istoimenom kompjuterskom programu postoji i mogućnost definiranja potpuno novih svojstava materijala (npr. kada se želi izvršiti optimalizacija materijala za neki novi proizvod na tržištu). Nakon odabira fluida slijedi odabir režima strujanja za prethodno generiranu mrežu elemenata u modelu. Za tip hidrodinamičke analize odabran je stacionaran režim

strujanja s referentnim tlakom od 101325 Pa bez prijenosa topline unutar modela i tzv. $k-\varepsilon$ model turbulencije (u programu k-Epsilon oznaka) kao što je prikazano na slici 50.



Slika 50. Definiranje fizikalnih parametara na numeričkom modelu u CFX kompjuterskom programu

Odabrani model turbulencije $k-\varepsilon$ je najčešće korišteni turbulentni model u CFX kompjuterskom programu za simuliranje karakteristika turbulentnog toka koji daje generalni opis turbulencije na temelju dviju transportnih jednadžbi. Prva varijabla (k) predstavlja turbulentnu kinetičku energiju, a druga transportna varijabla (ε) se odnosi na brzinu disipacije te turbulentne kinetičke energije. Transportna jednadžba za k (turbulentnu kinetičku energiju) opisana je izrazom (1) preuzetom iz [33], dok je transportna jednadžba za ε (brzinu disipacije od k) opisana izrazom (2) preuzetom iz [33]:

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \mu_t \left(\frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ (\mu + \mu_t / \sigma_k) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right\} - \rho \varepsilon + G_b - Y_M + S_k \quad (1)$$

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = C_{1\varepsilon} \left(\frac{\varepsilon}{k} \right) \left[\mu_t \left(\frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial U_j}{\partial x_i} + C_{3\varepsilon} G_b \right] + \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ (\mu + \mu_t / \sigma_\varepsilon) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right\} - C_{2\varepsilon} \rho \left(\frac{\varepsilon^2}{k} \right) + S_\varepsilon \quad (2)$$

Turbulentna viskoznost μ_t definirana je izrazom $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ preuzetim iz [33]. Vrijednosti σ_k , σ_b , $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, $C_{3\varepsilon}$ i C_μ su empirijski definirane konstante. Oznakama G_b , Y_M , S_k i S_ε unutar izraza (1) i (2) prikazane su vrijednosti varijabli kojima vlastitim odabirom možemo modelirati turbulenciju. Efekti kompresibilnosti označeni su oznakom Y_M , uzgon oznakom G_b , a oznakama S_k i S_ε korisnički definirani izvori. Efekti kompresibilnosti uglavnom potječu iz velikih promjena svojstva i karakteristika fluida, primjerice viskoznim zagrijavanjem [39].

Njihov utjecaj je opisan pomoću koeficijenata β_c i β_c^* kao funkcije Machovog broja kroz sljedeće izraze [40]:

$$\beta_c^* = \beta^*(1 + \xi^* F(M_t)) \quad (3)$$

$$\beta_c = \beta - \beta^* \xi^* F(M_t) \quad (4)$$

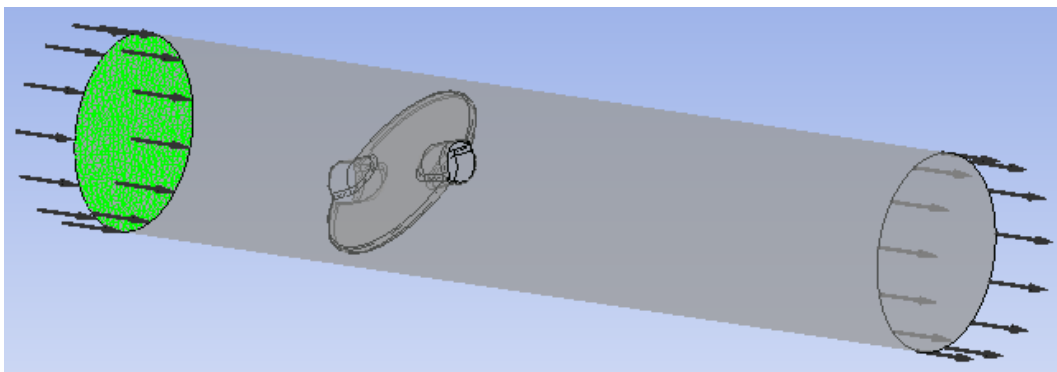
$$F(M_t) = (M_t^2 - M_{t0}^2)H(M_t - M_{t0}) \quad (5)$$

za vrijednosti $M_{t0} = 0,25$ i $\xi^* = 1,5$.

Turbulentni model $k-\varepsilon$ nema velike zahtjeve za memoriju računala pri proračunavanju, a može ga se koristiti za modele koji imaju interakciju s eksternim dotocima (vanjski dotoci fluida iz drugih cijevi). Nedostatci su mala preciznost rubovima modela, nepovoljnost gradijenta tlaka, te ograničena točnost kod velikih zakrivljenja toka i mlaznih tokova [41].

Karakteristike pojedinih turbulentnih modela u Ansys CFX kompjuterskom programu dane su kroz tablice 3. i 4.

Sljedeći korak je imenovanje i određivanje domene, ulaznog i izlaznog profila (Slika 51.). Za ulazni profil je zadana početna ulazna brzina vode od 1 m/s na površini cijelog ulaznog profila, dok je na izlaznom profilu definiran relativan tlak od 0 Pa što definira da je na zadnjem profilu vodoopskrbne cijevi izjednačenje tlaka s tlakom izvan cijevi, odnosno referentnim tlakom kojeg smo prethodno zadali kao atmosferski, tj. da na zadnjem profilu vlada slobodno istjecanje.



Slika 51. Prikaz modela cijevi i zatvarača unutar Ansys CFX-predprocesorskog dijela

Za sve vrijednosti fizikalnih veličina unutar Ansys CFX računalnog programa moguće je definirati mjerne jedinice, maksimalni broj iteracija za dobivanje točnijeg rješenja problema, točnost konvergencije rješenja i mnoge druge varijante zadavanja.

Tablica 3. Odabir modela turbulencije u Ansys Fluent i Ansys CFX kompjuterskim programima [33]

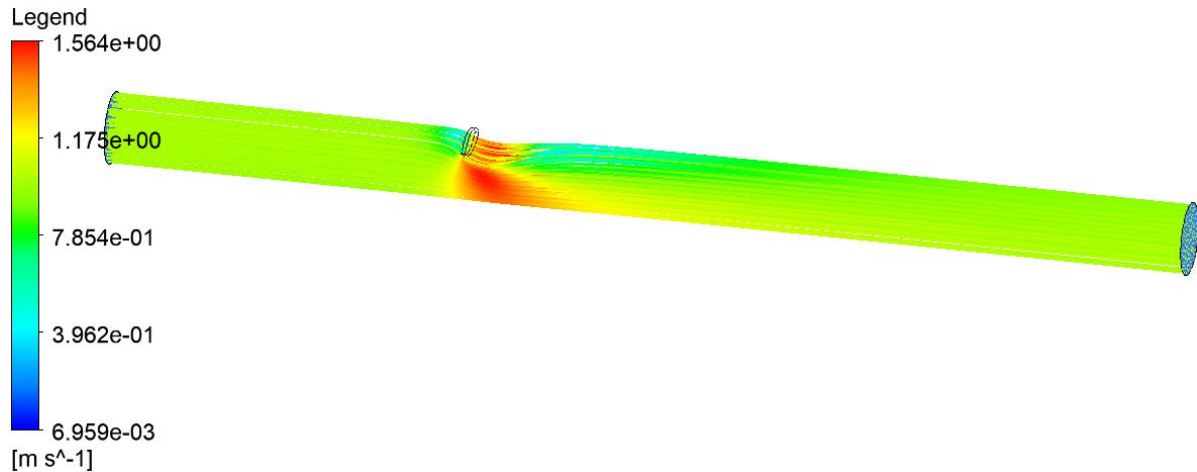
Model	Opis i značajke:
Spalart-Allmaras	Jednostavan model transportne jednadžbe koji izravno rješava modificiranu turbulentnu viskoznost. Dizajniran posebno za zrakoplovne primjene koje uključuju strujanja uz zid na finoj, gotovo zidnoj prilagođenoj mreži. Fluentova implementacija omogućuje upotrebu grubih mreža. Mogućnost uključivanja brzine deformacije u k poboljšava predviđanja vrtložnih strujanja.
Standardni $k-\varepsilon$	Bazično rješenje modela sa dvije transportne jednadžbe za k i ε . Ovo je zadani $k-\varepsilon$ model. Koeficijenti su empirijski izvedeni; vrijedi samo za potpuno turbulentne tokove. Primjena za viskozno grijanje, uzgon i kompresibilnost koji koriste druge $k-\varepsilon$ modele.
RNG $k-\varepsilon$ (renormalizacijska grupna analiza Navier-Stokesove jednadžbe)	Varijanta standardnog $k-\varepsilon$ modela. Jednadžbe i koeficijenti su analitički izvedeni. Značajne promjene u ε jednadžbi poboljšavaju sposobnost modeliranja tokova sa vrlo velikim naprezanjima. Dodatne opcije pomažu u predviđanju vrtloženja i tokova kod niski vrijednosti Re brojeva.
Ostvarljiv $k-\varepsilon$	Varijanta standardnog $k-\varepsilon$ modela. Njegova „ostvarivost” proizlazi iz promjena koje omogućuju poštivanje određenih matematičkih ograničenja što u konačnici poboljšava performanse ovog modela. Ne smije se koristiti zajedno s više okretnih referentnih okvira.
Standardni $k-\omega$	Transportni model sa dvije jednadžbe za rješavanje k i ω , specifična brzina disipacije (ε/k) temeljena na Wilcoxu (1998). To je zadani $k-\omega$ model. Pokazuje vrhunske performanse za zidne turbulencije i strujanja sa niskim vrijednostima Re brojeva. Prikazuje potencijal za predviđanje prijelaza. Mogućnosti obuhvaćaju prijelazna, slobodna tangencijalna i kompresibilna strujanja.
SST $k-\omega$ (eng. Shear Stress Transport $k-\omega$ model)	Varijanta standardnog $k-\omega$ modela. Kombinira originalni Wilcoxov model (1988.) za uporabu u blizini zidova i standardni $k-\varepsilon$ model za proračun turbulencija dalje od zida uporabom funkcije miješanja. Također ograničava turbulentnu viskoznost kako bi se zajamčilo da je $\tau_t \sim k$. Mogućnosti prijelaza i smicanja posuđene od standardnog $k-\omega$ modela. Nema mogućnosti komprimiranja.
RSM (eng. Reynolds-Stress Model)	Reynoldsova naprežanja rješavaju se izravno s jednadžbama transporta kako bi se izbjegla pretpostavka izotropne viskoznosti drugih modela. Koristi se za visoko vrtložno strujanje. Kvadratna opcija tlačnog opterećenja poboljšava performanse za mnoga osnovna posmična strujanja.

Tablica 4. Ponašanje i uporaba RANS modela turbulencije u Ansys Fluent i Ansys CFX kompjuterskim programima [33]

Model	Ponašanje i uporaba:
Spalart-Allmaras	Ekonomičan za velike mreže. Slabo radi za 3D strujanja, slobodna posmična strujanja, strujanja s jakim separacijama. Prikladno za blago kompleksne (kvazi-2D) vanjska/unutarnja strujanja i strujanja pod gradijentom tlaka (npr. aeroprofilima, krilima, trupom aviona, projektilima, trupovima brodova i sl.).
Standardni $k-\varepsilon$	Robustan. Široko se koristi unatoč poznatim ograničenjima modela. Slabo djeluje na složena strujanja koja uključuju tešku promjenu tlaka ∇p , separaciju, jako zaobljenje strujnica. Pogodno za početne iteracije, početno pretraživanje alternativnih proračuna i parametarske studije.
RNG $k-\varepsilon$ (renormalizacijska grupna analiza Navier-Stokesove jednadžbe)	Prikladan je za složena posmična strujanja, uključujući naglo naprezanje, umjereno vrtloženje, vrtloge i lokalno prijelazne tokove (npr., separaciju, masivno odvajanje i opstrujavanje oko pojedinih geometrijskih tijela i širokokutnim difuzorima, prostorijama za ventilaciju i sl.).
Ostvarljiv $k-\varepsilon$	Pružuje uglavnom iste prednosti i ima slične aplikacije kao i RNG modeli. Nije ga moguće koristiti s više okretnih referentnih okvira. Možda točniji i lakši za konvergiranje od RNG modela.
Standardni $k-\omega$	Izvršne performanse za zidne granice, slobodna posmična strujanja i strujanja sa niskim vrijednostima Re brojeva. Prikladan za složene tokove graničnog sloja pod nepovoljnim gradijentom tlaka i odvajanja vrtloga (vanjska aerodinamika i turbostrojevi). Može se koristiti za prijelazne tokove (iako ima tendenciju predviđanja ranog prijelaza). Odvajanje vrtloga se obično predviđa da bude prekomjerno i rano.
SST $k-\omega$ (eng. Shear Stress Transport $k-\omega$ model)	Slične pogodnosti kao i standardni $k-\omega$ model. Ovisnost o udaljenosti zida čini ga manje prikladnim za slobodna posmična strujanja.
RSM (eng. Reynolds-Stress Model)	Fizički najsigurniji RANS model. Izbjegava pretpostavku izotropne vrtložne viskoznosti. Potrebno je više vremena i memorije procesora. Teže je konvergirati zbog bliskog povezivanja jednadžbi. Prikladan za složena 3D strujanja s jakim zakrivljenjem strujnica, snažnim vrtloženjem (npr. zakrivljeni kanal, rotirajuće prolazne struje, vrtložni gorionici s vrlo velikim ulaznim vrtloženjem, cikloni i sl.).

4.4. Postprocesiranje i analiza podataka

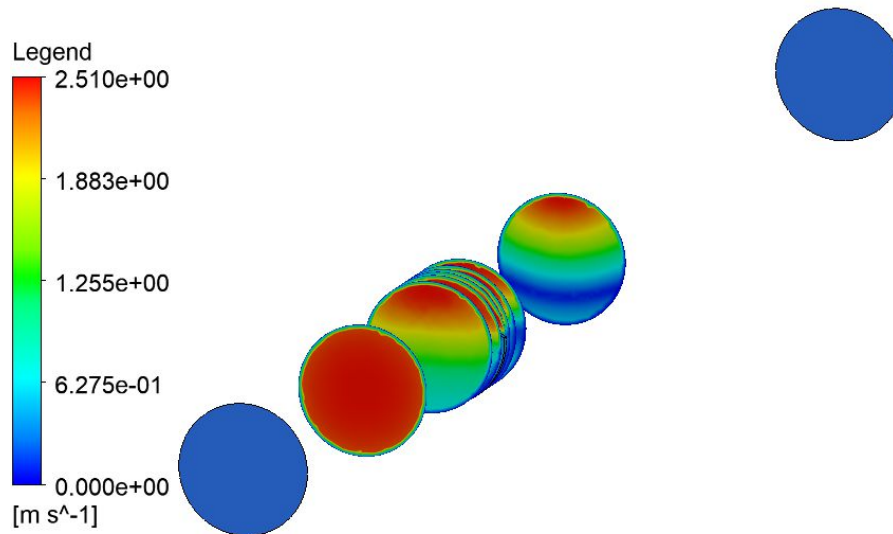
Postprocesiranje je korak nakon procesiranja u kojem se obrađuju i analiziraju dobiveni rezultati za analizirane numeričke modele/podmodele. U nastavku je objašnjen i prikazan korak postprocesiranja za početni model pločastog zatvarača s 20% zatvorenosti s ulaznom brzinom toka od 1 m/s. Dodan je prikaz strujnica sa njih ukupno 150 kako bi se dobio jasniji prikaz opstrujavanja fluida pomoću strujnica, odnosno varijabilnost brzina toka na cijelokupnom modelu.



Slika 52. Prikaz strujnica u Ansysovom CFX-postprocesorskom dijelu programa

Unutar CFX-postprocesorskog dijela programa moguće je dodavanje ploha/ravnina, točnije poprečni presjeci na kojima se kasnije mogu dati prikazi promjena brzina toka, tlakova, kinetičke energije, vrtložne viskoznosti i mnogih drugih fizikalnih veličina unutar dobivenog modela. Nakon izrada odgovarajućih ravnina i definiranja prikaza na ravninama moguća je izrada animacija za niz ravnina, odnosno dobivanje grafičkog prikaza kretanja neke fizikalne veličine (npr. brzina toka) kroz vodoopskrbnu cijev. Osim toga moguće je dodavanje pojedinih varijabli, grafova, izraza i tablica u kojima je moguće izračunati vrijednosti raznih fizikalnih veličina u željenim pozicijama unutar numeričkog modela, što je korišteno tokom postprocesiranja leptirastih modela za izračun količine fluida koja struji s pojedine strane zatvarača. Za svaki od modela dodano je 7 do 13 poprečnih profila čiji položaj ovisi o položaju i stupnju otvorenosti zatvarača i 10 uzdužnih profila na kojima su prikazane vrijednosti raznih fizikalnih veličina. Fizikalne veličine koje su prikazane na ploham su brzina toka (v), relativni tlak (p), totalni tlak (P), dinamička viskoznost (η), brzine u smjeru u (x), smjeru v (y) i smjeru w (z), mjera deformacije smicanjem (γ), kinetička energija turbulencije (k) i vrtložna viskoznost (μ). Na svakoj od ravnina s definiranom fizikalnom veličinom moguće je uvidjeti maksimalnu i minimalnu vrijednost u promatranom profilu. Kod

leptirastih zatvarača dodane su ravnine kroz sredinu zatvarača (uzdužno s pločom zatvarača) na način da je određeno središte između ruba ploče zatvarača i stjenke cijevi i izračunata normala kako bi se dobila ravnina koja prolazi kroz ploču zatvarača. Na taj je način uz tablicu u postprocesiranju izračunat maseni protok za donji i gornji otvor kod leptirastog zatvarača kako bi se saznalo gdje je veći protok. Na slici 53. su prikazani poprečni profili s promijenjenim vrijednostima brzine, te dva plava profila koji označavaju ulazni i izlazni profil vodoopskrbne cijevi.

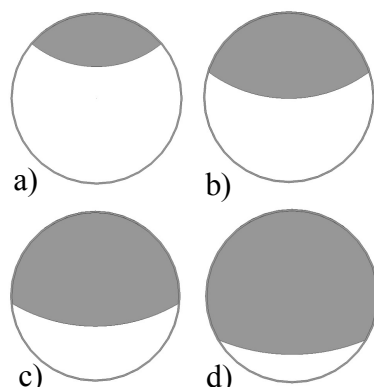


Slika 53. Poprečni profili varijabilnosti brzina kod numeričkog modela s pločastim zatvaračem

4.5. Podmodeli pločastih zatvarača

Pločasti zatvarač analiziran je u 4 položaja/dispozicije, a to su 20%, 40%, 60% i 80% zatvorenosti. Za svaki od ovih podmodela, odnosno stupnja zatvorenosti provedena je hidrodinamička analiza opstrujavanja fluida oko zatvarača za slučaj ulazne brzine toka od 1,0 m/s i 1,5 m/s. Ostali rubni uvjeti i ulazne varijable ostaju nepromijenjene kao što je prethodno opisano u podpoglavlju 4.3. Hidrodinamička analiza opstrujavanja fluida oko pločastog zatvarača sprovedena je za 4 pločasta modela zatvarača i 2 varijante nazvane A i B za svaki model. Podmodeli su imenovani redom 1A, 1B, 2A, 2B, 3A, 3B, 4A i 4B i njihove su hidrauličke analize opisane u podpoglavlju 5.1. Varijante A imaju ulaznu brzinu od 1 m/s, a varijante B ulaznu brzinu od 1,5 m/s. Prvi je model pločasti zatvarač s 20% zatvorenosti, drugi je pločasti zatvarač s 40% zatvorenosti, treći je pločasti zatvarač s 60% zatvorenosti i posljednji, četvrti je pločasti zatvarač s 80% zatvorenosti. Sva četiri modela zatvarača

prikazana su na slici 54., prvi model gore lijevo (a)), drugi model gore desno (b)), treći model dolje lijevo (c)) i četvrti model dolje desno (d)).

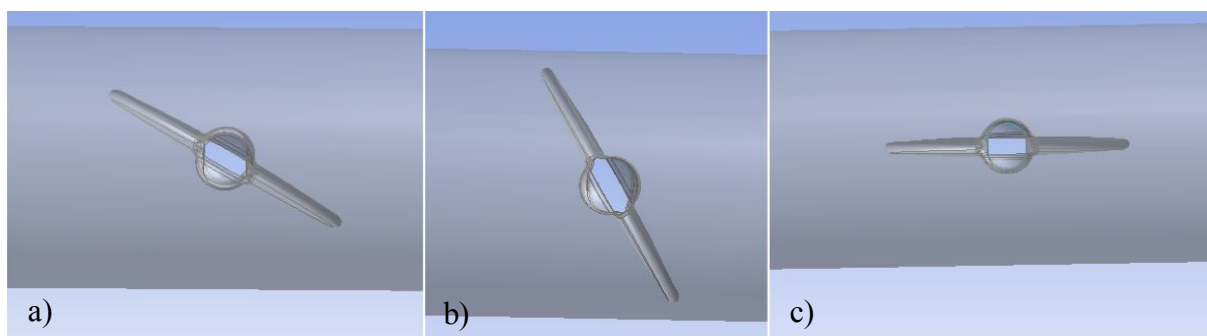


Slika 54. Modeli pločastog zatvarača s različitim stupnjem zatvorenosti

a) 20% zatvorenosti, b) 40% zatvorenosti, c) 60% zatvorenosti i d) 80% zatvorenosti

4.6. Podmodeli leptirastih zatvarača

Leptirasti zatvarač analiziran je u 3 položaja/dispozicije, a to su otvorenost pod 30° , 60° i 90° . Za svaki od ovih podmodela, odnosno stupnja zatvorenosti provedena je hidrodinamička analiza opstrujavanja fluida oko leptirastog zatvarača za slučaj ulazne brzine od $1,0 \text{ m/s}$ i za $1,5 \text{ m/s}$. Ostali rubni uvjeti i ulazne fizikalne veličine ostaju nepromijenjene kao što je prethodno opisano u podpoglavlju 4.3. Hidrodinamička analiza opstrujavanja fluida oko leptirastog zatvarača provedena je za 3 modela zatvarača i 2 varijante nazvane A i B za svaki model. Podmodeli su imenovani redom 1A, 1B, 2A, 2B, 3A i 3B, a njihove su hidrodinamičke analize opisane u podpoglavlju 5.2. Varijante A imaju ulaznu brzinu toka od 1 m/s , a varijante B ulaznu brzinu toka od $1,5 \text{ m/s}$. Prvi je model leptirasti zatvarač s otvorenošću pod kutem od 30° (Slika 55.a)), drugi je leptirasti zatvarač s otvorenošću pod kutem od 60° (Slika 55.b)) i posljednji, treći je leptirasti zatvarač otvoren pod kutem od 90° , odnosno potpuno otvoren zatvarač (Slika 55.c)).



Slika 55. Modeli leptirastog zatvarača s različitim stupnjem otvorenosti
a) zatvarača pod 30° otvorenosti, b) 60° otvorenosti, c) 90° otvorenosti zatvarača u odnosu na smjer
toka fluida

5. HIDRODINAMIČKA ANALIZA I REZULTATI ISTRAŽIVANJA

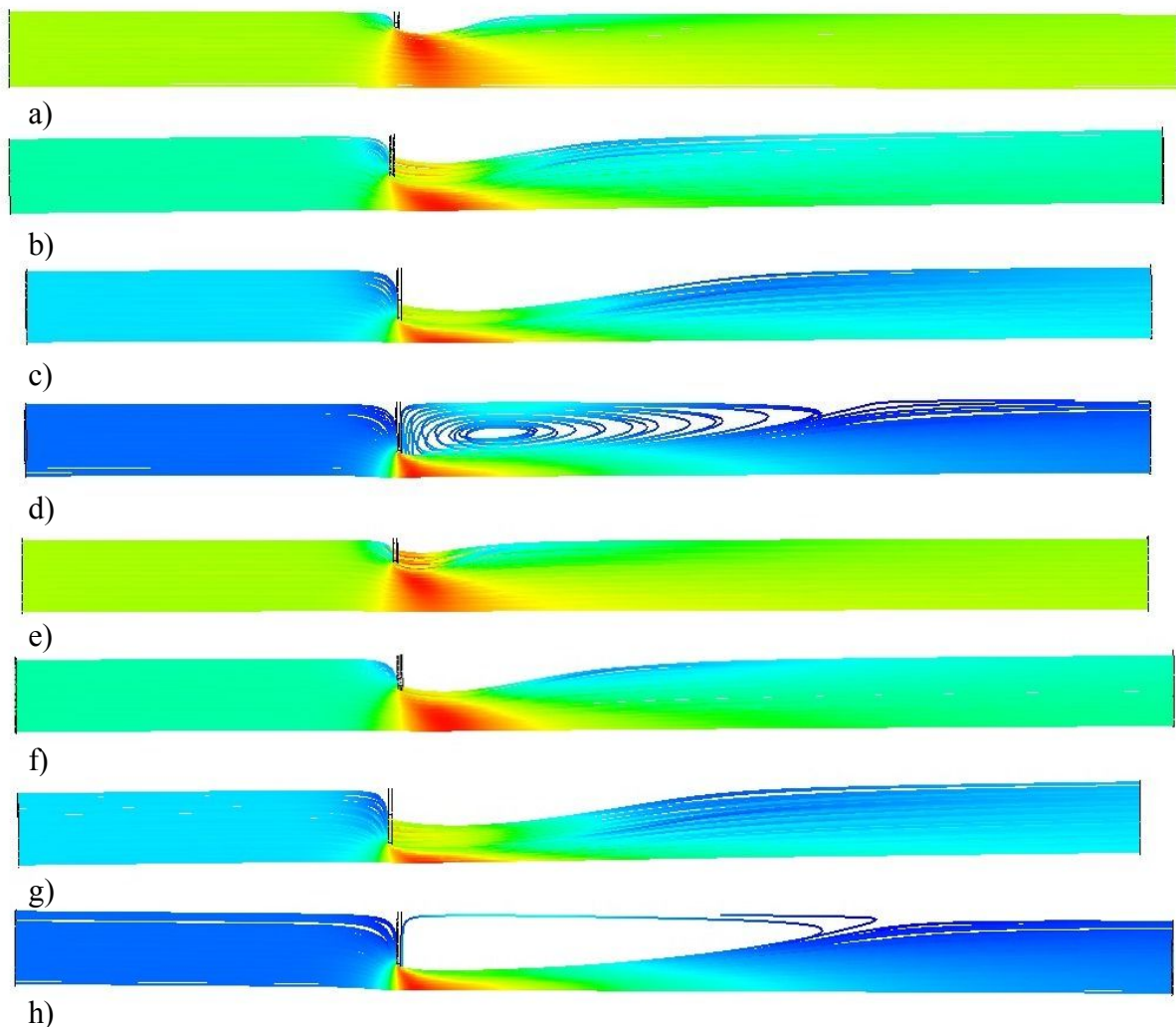
5.1. Rezultati ispitivanja pločastih zatvarača

U ovom su poglavlju obrađeni rezultati hidrodinamičke analize opstrujavanja fluida oko pločastog zatvarača za sve podmodele spomenute u Poglavlju 4. U nastavku su međusobno uspoređene obrađene varijante u svakom podpoglavlju za pojedinu fizikalnu veličinu. Obrađivane fizikalne veličine su brzina toka (v), relativni tlak (p), totalni tlak (P), dinamička viskoznost (η), vrtložna viskoznost (μ), kinetička energija turbulencije (k), mjera deformacije smicanjem (γ), i brzine toka u smjerovima osi x (u), osi y (v) i osi z (w). Dana su objašnjenja dobivenih rezultata i usporedbe razlike rezultata među pojedinim modelima/podmodelima i varijantama. Prikazane su karakteristične vrijednosti fizikalnih veličina u značajnim korisnički definiranim profilima. Svaka od fizikalnih veličina mjerena je i prikazana na 8 poprečnih i 9 uzdužnih profila koji su za sve fizikalne veličine odabrani na jednakim pozicijama/ravninama. Poprečni profili pozicionirani su na način da je prvi pozicioniran na polovici raspona između početka cijevi i zatvarača, drugi neposredno ispred zatvarača, četvrti profil prolazi kroz središte zatvarača, sljedeća tri neposredno iza zatvarača i posljednji na polovici između zatvarača i kraja cijevi. Uzdužni profili pozicionirani su na način da je središnji peti profil pozicioniran na sredini cijevi, a po četiri uzdužna profila postavljena su simetrično na jednakim udaljenostima na obje strane središnjeg profila. Uzdužni profili za modele pločastih zatvarača postavljeni su okomito na disk pločastog zatvarača.

5.1.1. Brzina toka fluida

Brzine unutar modela mogu se osim na profilima prikazati i strujnicama. Strujnice su krivulje koje povezuju točke s istim vrijednostima brzina toka. Na slici 56. prikazani su modeli s pločastim zatvaračima, svaki sa 150 strujnica. Prva 4 modela prikazuju modele s ulaznom brzinom od 1 m/s, a posljednjih 4 modele s ulaznom brzinom od 1,5 m/s. Na temelju slike uočljiva je pojava vrtložnog strujanja u području iza zatvarača kod modela pločastih zatvarača s 80% zatvorenosti što je posljedica naglog suženja protočne površine na području zatvarača gdje također dolazi i do povećanja brzine toka. Najveće brzine toka (prikazane crvenom bojom) vidljive su u području ispod, i neposredno iza zatvarača. Strujnice svakog od modela prikazane su lokalnim vrijednostima, što znači da boje nisu univerzalne i jednake na svakom od modela, pa se iz tog razloga brzine toka na modelu ne mogu međusobno uspoređivati ovisno o nijansama boja, već jedino pojedinačno. Razlog tome je što pri

postavljanju jednakih granica za sve modele dolazi do manje razlike u nijansama boja za većinu modela, jer je minimalna i maksimalna vrijednost brzine toka svih modela veoma različita, pa se kod pojedinih modela nebi vidjela razlika brzina toka zbog male razlike u vrijednosti minimalne i maksimalne brzine toka fluida. Iz tog je razloga modele na slici 56. preporučljivo promatrati zasebno, a ne uspoređivati međusobno grafički. Za međusobnu usporedbu brzina koristiti će se tablični prikaz vrijednosti brzina toka za modele pločastog zatvarača.



Slika 56. Prikaz modela pločastih zatvarača sa strujnicama

a) model s 20% zatvorenosti i ulaznom brzinom od 1 m/s, b) model s 40% zatvorenosti i ulaznom brzinom 1 m/s, c) model s 60% zatvorenosti i ulaznom brzinom 1 m/s, d) model s 80% zatvorenosti i ulaznom brzinom 1 m/s, e) model s 20% zatvorenosti i ulaznom brzinom 1,5 m/s, f) model s 40% zatvorenosti i ulaznom brzinom 1,5 m/s, g) model s 60% zatvorenosti i ulaznom brzinom 1,5 m/s i h) model s 80% zatvorenosti i brzinom 1,5 m/s

Maksimalne, minimalne i srednje vrijednosti brzina toka za svaki od modela/podmodela i obje ulazne brzine toka u m/s prikazane su u tablici 5. Vidljivo je kako je maksimalna brzina toka veća što je stupanj zatvorenosti zatvarača manji, dakle kod manjih protočnih površina dolazi do pojave većih brzina toka fluida, u ovom slučaju vode kao što je definirano u postupku predprocesiranja. Proučavanje maksimalnih vrijednosti bitno je za dimenzioniranje zatvarača iz razloga što veće brzine toka mogu oštetiti konstrukciju zatvarača, pa je potrebno pravilno dimenzionirati zatvarač. Vrijednosti koje je bitno usporediti jesu srednje vrijednosti brzina toka zbog toga što srednja vrijednost daje realniji prikaz brzine toka unutar modela.

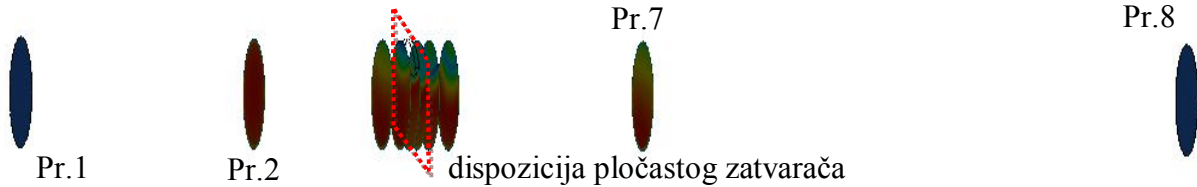
Tablica 5. Prikaz maksimalnih, minimalnih i srednjih vrijednosti brzine toka za svaki od modela pločastog zatvarača

Postotak zatvorenosti zatvarača	v=1 m/s			v=1,5 m/s		
	Max	Min	Sr	Max	Min	Sr
20	1,564	0,007	1,035	2,337	0,021	1,553
40	2,533	0,003	1,195	3,797	0,004	1,795
60	4,415	0,004	1,594	6,633	0,003	2,390
80	10,585	0,002	2,780	15,884	0,004	4,220

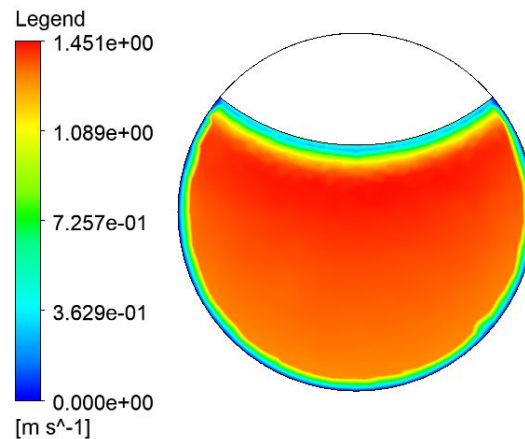
Iz prethodne tablice je vidljivo kako se prosječna i maksimalna brzina toka unutar modela eksponencijalno povećavaju ovisno o postotku zatvorenosti pločastog zatvarača. Obavljen je izračun postotka povećanja brzine toka za prosječne i maksimalne vrijednosti brzine toka na temelju tablice 5. Postotci povećavanja poklapaju se na drugu decimalu i za srednje vrijednosti iznose redom, 115,5 % s 20 % na 40 % zatvorenosti, 133 % s 40 % na 60 % zatvorenosti i 175 % s 60 % na 80 % zatvorenosti. Postotci povećavanja maksimalnih vrijednosti iznose jednakim redoslijedom, 162 %, 175 % i 240 %. Na temelju poklapanja može se ustanoviti eksponencijalna veza povećanja maksimalnih i srednjih vrijednosti brzine toka za provedene pozicije zatvorenosti pločastog zatvarača. Za minimalne vrijednosti ovakav tip veze ne postoji, što je jasno vidljivo iz prethodne tablice. Vrijednosti maksimuma i minimuma Ansys kompjuterski program sam prikazuje u izborniku pri odabiru strujnica, dok su srednje vrijednosti izračunate putem tabličnog kalkulatora unutar samog Ansys programa, pa je na taj način osigurano da ne dođe do „ljudske“ greške prilikom izračuna vrijednosti.

Poprečni profili u kojima se mjere fizikalne vrijednosti postavljeni su na način da su prva dva profila gledano iz smjera strujanja pozicionirana ispred zatvarača na različitim udaljenostima, treći profil neposredno ispred zatvarača, četvrti na samom zatvaraču, sljedeća tri na nejednakim udaljenostima neposredno iza zatvarača i posljednji na približno 250 mm iza zatvarača. Raspored poprečnih profila prikazan je na slici 57., dok je na slici 58. prikazan

poprečni profil brzine na položaju zatvarača s 20 % zatvorenosti s pripadajućom legendom za varijantu ulazne brzine 1 m/s. Crvenom oznakom na slici 57. prikazana je dispozicija zatvarača.



Slika 57. Raspored poprečnih profila kod pločastih modela u odnosu na dispoziciju zatvarača



Slika 58. Poprečni profil brzine toka na pločastom zatvaraču s 20 % zatvorenosti

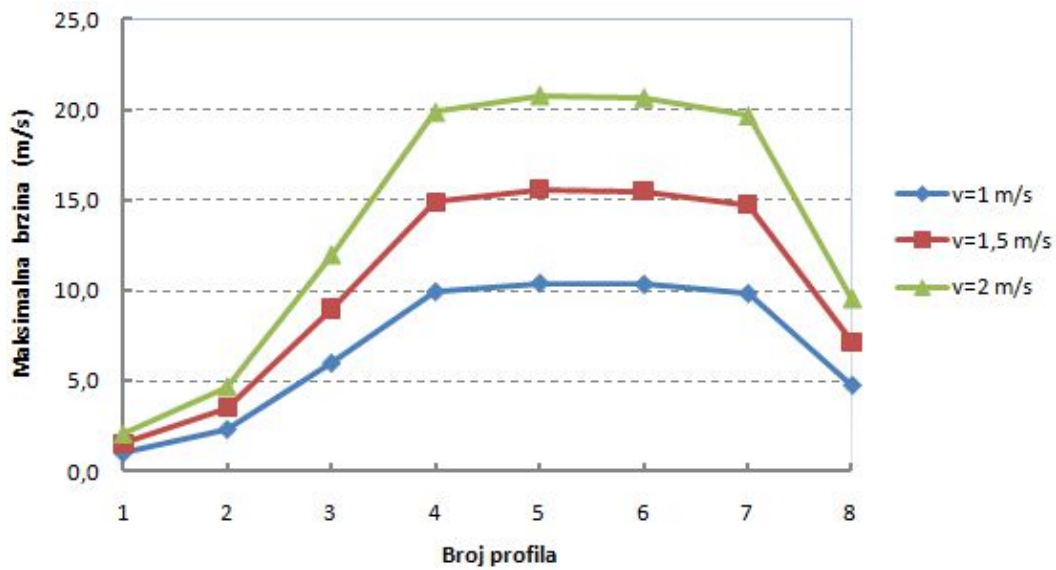
U tablici 6. su prikazane maksimalne i srednje vrijednosti brzina toka za sve položaje zatvorenosti zatvarača s ulaznim brzinama 1 m/s i 1,5 m/s na poprečnim profilima. Podebljano unutar tablice su označene najveće vrijednosti maksimalnih i srednjih vrijednosti brzina toka za svaki postotak zatvorenosti zatvarača.

Tablica 6. Prikaz maksimalnih i srednjih vrijednosti brzina toka na pločastom zatvaraču kod mjerodavnih poprečnih profila

Profil	v=1 m/s								v=1,5 m/s							
	20% zatvorenost		40% zatvorenost		60% zatvorenost		80% zatvorenost		20% zatvorenost		40% zatvorenost		60% zatvorenost		80% zatvorenost	
	Max	Sr	Max	Sr	Max	Sr	Max	Sr	Max	Sr	Max	Sr	Max	Sr	Max	Sr
1	1,028	0,999	1,028	0,988	1,028	0,988	1,028	0,987	1,538	1,485	1,537	1,484	1,537	1,484	1,537	1,483
2	1,153	0,992	1,371	1,022	1,724	1,077	2,338	1,144	1,726	1,490	2,051	1,535	2,588	1,617	3,511	1,718
3	1,286	1,007	1,765	1,249	2,757	1,640	5,992	2,395	1,922	1,512	2,640	1,873	4,134	2,461	8,991	3,595
4	1,452	1,027	2,133	1,396	3,748	2,386	9,933	6,492	2,174	1,540	3,196	2,096	5,627	3,582	14,905	9,747
5	1,525	1,015	2,283	1,197	4,026	1,587	10,400	2,676	2,276	1,512	3,428	1,802	6,043	2,386	15,594	4,022
6	1,562	1,165	2,427	1,403	4,255	1,803	10,336	2,618	2,336	1,728	3,651	2,118	6,389	2,709	15,503	3,934
7	1,512	1,156	2,526	1,569	4,414	1,971	9,835	2,811	2,262	1,716	3,790	2,368	6,630	2,958	14,758	4,215
8	1,158	0,983	1,586	0,968	2,510	1,138	4,776	2,038	1,744	1,476	2,394	1,456	3,788	1,710	7,142	3,017

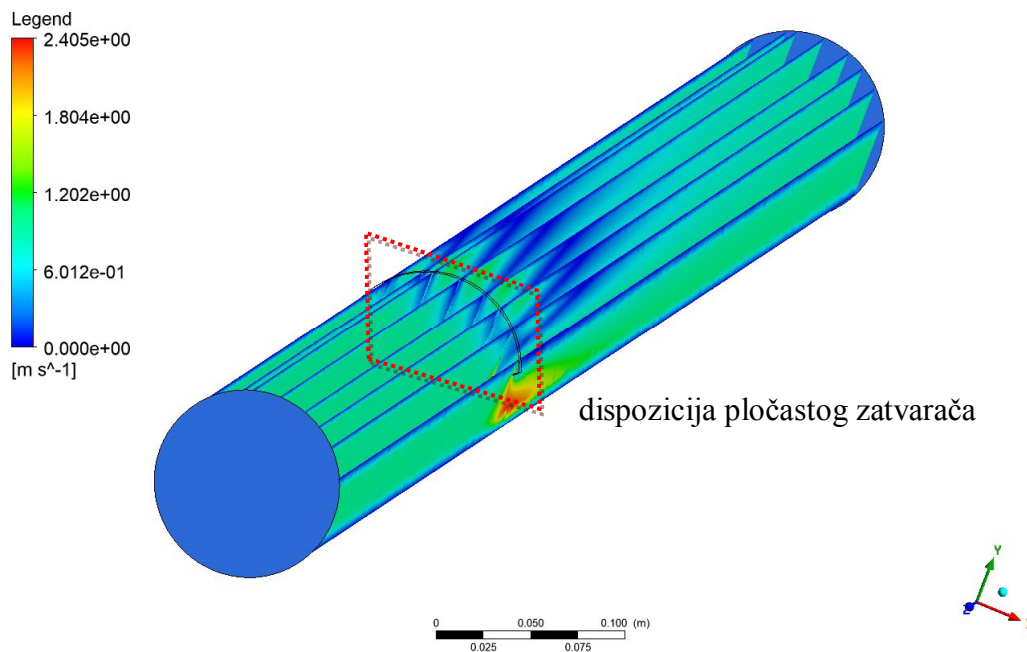
Polozicije najvećih maksimalnih i srednjih vrijednosti brzina toka fluida mjenjaju se ovisno o postotku zatvorenosti zatvarača kao što je vidljivo iz tablice 6. Također je uočljivo

kako vrijednosti maksimalnih i srednjih brzina toka eksponencijalno rastu s postotkom zatvorenosti za sve profile u neposrednoj blizini zatvarača. Kod modela s 20 % zatvorenosti i ulaznom brzinom toka od 1 m/s srednja vrijednost brzine toka na zatvaraču iznosi 1,027 m/s, kod modela s 40 % zatvorenosti 1,396 m/s, kod modela s 60 % zatvorenosti 2,386 m/s, a kod modela s 80 % zatvorenosti čak 6,492 m/s. Pototak povećanja brzine toka nije moguće opisati matematički, jer raspored brzina nije jednak na svakom poprečnom profilu. Do pojave maksimalnih brzina toka dolazi pri većim zatvorenostima (na 5. profilu), neposredno iza zatvarača i iznose 10,4 m/s kod modela s ulaznom brzinom od 1 m/s i 15,594 m/s kod modela s ulaznom brzinom od 1,5 m/s. Maksimalne brzine toka kod položaja manje zatvorenosti zatvarača javljaju se udaljenije iza zatvarača, dok se kod modela s većim postotkom zatvorenosti zatvarača maksimalne vrijednosti brzine toka javljaju sve bliže zatvaraču zbog naglog suženja protočne površine. Za najveće prosječne brzine toka unutar modela vrijedi gotovo jednaka tvrdnja kao za položaj pojavljivanja maksimalnih brzina toka, jedino što se kod modela s 60 i 80 % zatvorenosti maksimalni srednji protok unutar modela nalazi točno na zatvaraču, što ukazuje da dolazi do naglije promjene brzine toka. Iz toga se može zaključiti kako je za modeliranje zatvarača od obrađenih podmodela najbitniji model s 80 % zatvorenosti, gdje se javljaju maksimalne vrijednosti brzine toka. Osim toga, potrebno je predvidjeti moguće oštećenje cijevi neposredno iza zatvarača zbog pojava velikih brzina toka prilikom otvaranja i zatvaranja zatvarača. Odnos maksimalnih i srednjih brzina toka na poprečnim profilima veći je 1,5 puta kod modela s ulaznim brzinama 1,5 m/s uspoređujući s modelima ulazne brzine od 1 m/s za poprečne presjeke bliže zatvaraču, dok se za udaljenije profile pojavljivanje manje odstupanje s točnošću na treću decimalu. Na temelju veze tog međuođnosa moguće je pretpostaviti, odnosno izračunati maksimalne vrijednosti brzine za profil na zatvaraču za neku drugu ulaznu brzinu toka uzevši u obzir kako će točnost predviđene vrijednosti padati udaljavajući se od inicijalne ulazne brzine toka. Grafički prikaz pretpostavljenih vrijednosti brzine toka za pločasti model s 80 % zatvorenosti s ulaznom brzinom toka od 2 m/s u usporedbi s jednakim modelom s ulaznim brzinama od 1 m/s i 1,5 m/s prikazan je na slici 59. Plavom bojom je prikazana promjena maksimalnih brzina po poprečnim profilima za model s ulaznom brzinom toka od 1 m/s, crvenom bojom za model s ulaznom brzinom toka od 1,5 m/s i zelenom krivuljom pretpostavljene maksimalne vrijednosti brzine toka po profilima na temelju međuođnosa brzina toka za modelu s ulaznom brzinom od 2 m/s. Pretpostavljena maksimalna vrijednost brzine toka na 5. profilu za ulaznu brzinu od 2 m/s iznosi 20,80 m/s.



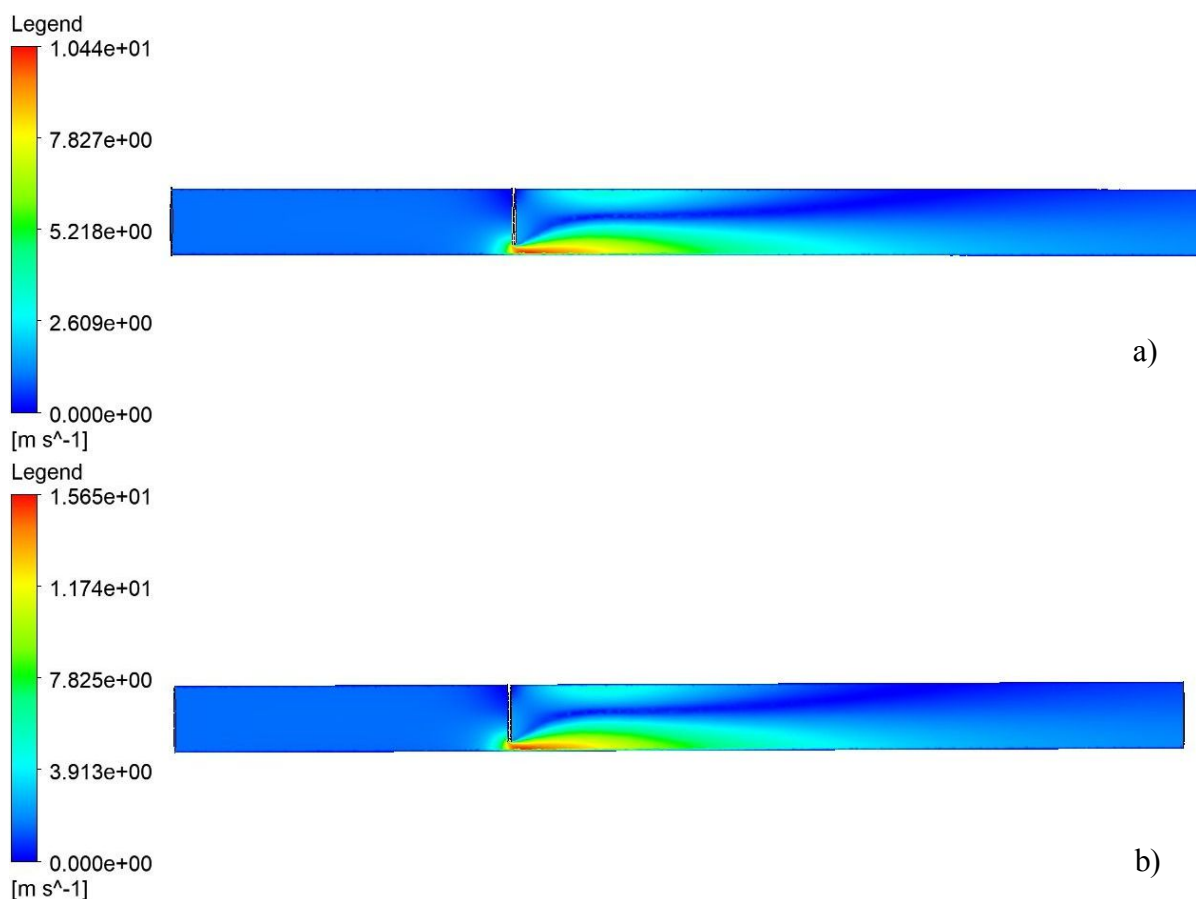
Slika 59. Grafički prikaz vrijednosti maksimalnih brzina toka za pločasti model s 80 % zatvorenosti na temelju poprečnih profila

Unutar rezultata pločastih modela definirano je 9 uzdužnih profila. Uzdužni profili kod pločastih modela zatvarača postavljeni su na identičnim razmacima, počevši od ruba cijevi prema sredini, na način da središnji profil (profil 5) bude postavljen tako da sječe sredinu zatvarača gledano okomito na zatvarač. Prikaz položaja uzdužnih profila vidljiv je na slici 60. na primjeru pločastog zatvarača s 40 % zatvorenosti.



Slika 60. Prikaz položaja uzdužnih profila kod modela pločastog zatvarača

Uzdužni profili najpreglednije prikazuju promjenu brzine toka uzduž cijevi, te prijelaze brzine toka od ulazne brzine, zatim povećanje na području zatvarača i iza njega, te ponovni pad brzine toka na određenoj udaljenosti iza zatvarača, što je najbolje vidljivo kod većih brzina toka. Na sljedećoj slici 61. prikazani su središnji uzdužni profili brzina toka za modele s 80 % zatvorenosti, iz razloga što su kod tih modela maksimalne i srednje brzine toka najveće.



Slika 61. Središnji uzdužni profili brzina toka za 80 % otvorenosti zatvarača

a) model s ulaznom brzinom od 1 m/s, b) model s ulaznom brzinom od 1,5 m/s

Gornji dio slike 61.a) prikazuje model s ulaznom brzinom toka od 1 m/s, a donji dio slike 61.b) prikazuje model s ulaznom brzinom toka od 1,5 m/s. S pripadajućih legendi moguće je očitati brzine toka na uzdužnim profilima, te vidjeti kako se brzina toka mijenja uzduž modela. Uočljivo je kako je oblik profila brzina toka gotovo jednakog oblika za uzdužne profile oba numerička modela, iako je ulazna brzina toka različita. Na temelju grafičkog prikaza može se zaključiti da je raspodjela brzina toka približno ista i jednakog raspona iza zatvarača, pa se na temelju toga može pretpostaviti da će oblik raspodjele brzina toka za ostale ulazne brzine biti jednakog oblika, ali drukčijih vrijednosti kao što je prethodno

spomenuto pri analizi brzina toka za poprečne profile. Maksimalna brzina toka javlja se u području zatvarača i kod gornjeg modela iznosi 10,44 m/s, dok kod donjeg iznosi 15,65 m/s, što daje omjer od 1,499, odnosno točnost na treću decimalu iz čega se kako je prethodno spomenuto može predvidjeti maksimalna brzina toka za neke druge ulazne brzine toka za jednak oblik modela. Za ulaznu brzinu toka od 3 m/s maksimalna bi brzina toka na temelju međuodnosa iznosila približno 31,32 m/s.

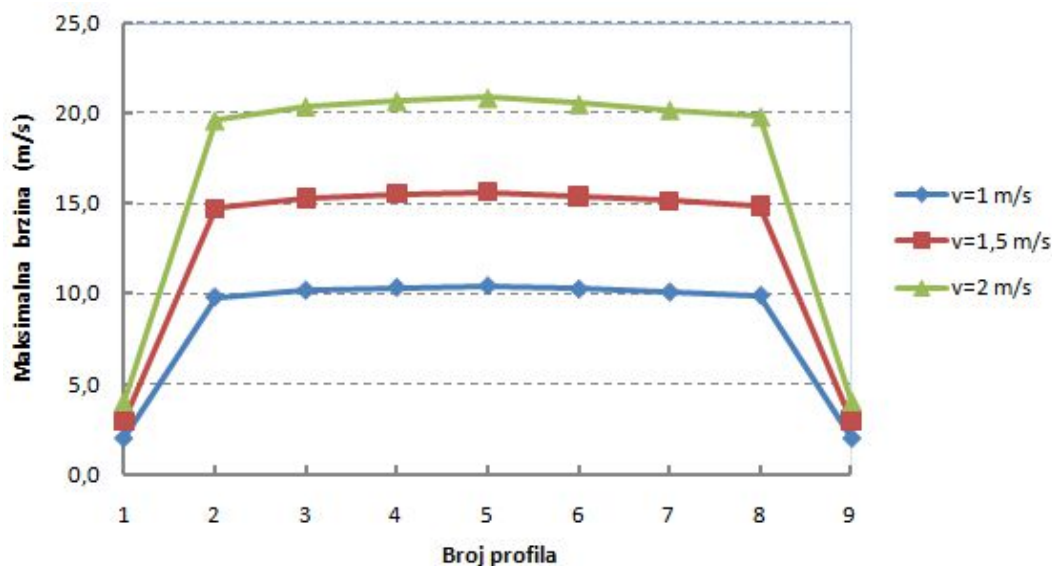
U tablici 7. su prikazane maksimalne i srednje vrijednosti brzina toka za sve položaje zatvorenosti zatvarača s ulaznim brzinama 1 m/s i 1,5 m/s na uzdužnim profilima. Podebljano unutar tablice su označene najveće vrijednosti maksimalnih i srednjih vrijednosti brzina toka za svaki postotak zatvorenosti zatvarača.

Tablica 7. Prikaz maksimalnih i srednjih vrijednosti brzina toka na pločastom zatvaraču kod mjerodavnih uzdužnih profila

Profil	v=1 m/s								v=1,5 m/s							
	20% zatvorenost		40% zatvorenost		60% zatvorenost		80% zatvorenost		20% zatvorenost		40% zatvorenost		60% zatvorenost		80% zatvorenost	
	Max	Sr	Max	Sr	Max	Sr	Max	Sr	Max	Sr	Max	Sr	Max	Sr	Max	Sr
1	1,561	1,015	2,378	1,019	3,806	0,994	2,021	0,976	2,333	1,529	3,584	1,541	5,712	1,497	2,963	1,453
2	1,559	1,002	2,522	1,027	4,160	1,110	9,816	1,325	2,326	1,505	3,787	1,546	6,245	1,668	14,730	1,970
3	1,549	0,982	2,532	1,040	4,356	1,195	10,198	1,635	2,309	1,472	3,796	1,562	6,540	1,793	15,295	2,438
4	1,551	0,981	2,529	1,042	4,383	1,208	10,347	1,702	2,311	1,470	3,793	1,565	6,582	1,813	15,517	2,541
5	1,549	0,981	2,529	1,052	4,413	1,243	10,437	1,787	2,308	1,469	3,788	1,578	6,627	1,864	15,650	2,670
6	1,545	0,981	2,528	1,044	4,390	1,213	10,264	1,700	2,302	1,470	3,792	1,565	6,592	1,819	15,390	2,541
7	1,547	0,986	2,527	1,035	4,333	1,182	10,098	1,566	2,306	1,479	3,792	1,553	6,506	1,773	15,146	2,339
8	1,553	1,002	2,521	1,027	4,160	1,116	9,911	1,337	2,318	1,506	3,788	1,542	6,248	1,674	14,871	1,998
9	1,563	1,016	2,405	1,026	3,946	0,997	2,022	0,971	2,336	1,530	3,617	1,539	5,918	1,498	2,987	1,456

Vrijednosti na prvom i posljednjem profilu nisu jednake zbog toga što je prvi profil bliži stijenci cijevi u odnosu na posljednji profil. Vidljivo je kako su vrijednosti gotovo simetrične. Razlog nesimetričnosti nalazi se u tome što profili ne mogu biti postavljeni s dovoljnom preciznošću kako bi bili simetrični u odnosu na središnju os cijevi, jer je prije svega teško precizno odrediti središte cijevi, a promjer cijevi je tek 100 mm. Pri modeliranjima većih promjera postavljanje profila bilo bi preciznije, no to nije moguće zbog ograničenosti brojem elemenata i čvorova unutar studentske verzije kompjuterskog programa. Može se zaključiti kako su brzine toka simetrične po uzdužnim profilima ukoliko je središnji profil postavljen u smjeru sile gravitacije kroz središnju os cijevi, jer su podudaranja brzina toka s točnošću druge, a kod manjih brzina toka i treće decimale. Najveće maksimalne i srednje vrijednosti brzine toka kod zatvarača s 20 % zatvorenosti nalaze se bliže stijenci, kod zatvarača s 40 % zatvorenosti se približavaju središnjem profilu, dok se kod zatvarača sa 60 i 80 %-tnom zatvorenošću nalaze na središnjem profilu. Najveće maksimalne brzine toka na definiranim uzdužnim profilima iznose 10,437 m/s za model s ulaznom brzinom 1 m/s i 15,650 za model s ulaznom brzinom od 1,5 m/s, dok najveće prosječne brzine toka iznose

1,787 m/s, odnosno 2,670 m/s. Na temelju zadovoljenog međuodnosa numeričkog modela, jednako kao što je opisano i obrađeno za poprečne profile, moguće je izračunati vrijednosti brzina toka na uzdužnim profilima za ostale ulazne brzine. Grafičkim prikazom na slici 62. dani su prikazi vrijednosti maksimalnih brzina toka po uzdužnim profilima za model s 80 % zatvorenosti zatvarača, te pretpostavljene izračunate vrijednosti za jednaki model s ulaznom brzinom od 2 m/s za koji maksimalna brzina toka iznosi 20,874 m/s.



Slika 62. Grafički prikaz vrijednosti maksimalnih brzina toka za pločasti model s 80 % zatvorenosti zatvarača na temelju uzdužnih profila

5.1.2. Relativni tlak

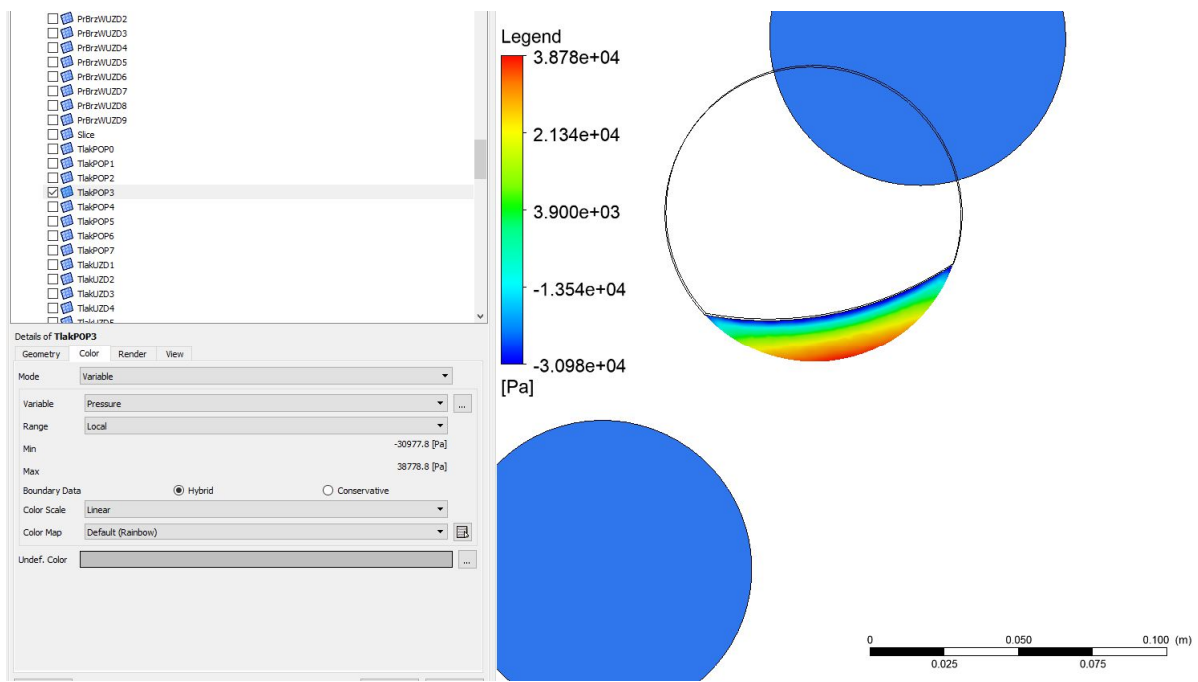
Unutar CFD modeliranja na temelju $k-\varepsilon$ turbulentnog modela moguće je odabrati izračune relativnih i totalnih (ukupnih) tlakova za svaki od numeričkih modela/podmodela. Relativan tlak unutar Ansys Fluent kompjuterskog programa definiran je imenom tlak, te predstavlja vrijednost tlaka iznad definirane referentne vrijednosti. Totalni tlak opisan je u sljedećem potpoglavlju. Unutar ovog poglavlja prikazani su i opisani relativni tlakovi i njihove vrijednosti unutar modela pločastih zatvarača. Sve spomenute vrijednosti u nastavku vezane uz tlakove biti će izražene u paskalima (Pa) kako bi se preciznije dočarala promjena relativnih tlakova unutar cijevi.

U nastavku je dana tablica 8. s vrijednostima maksimalnih, srednjih i minimalnih relativnih tlakova za sve podmodele pločastih zatvarača.

Tablica 8. Prikaz maksimalnih, minimalnih i srednjih vrijednosti relativnih tlakova za svaki od modela pločastog zatvarača

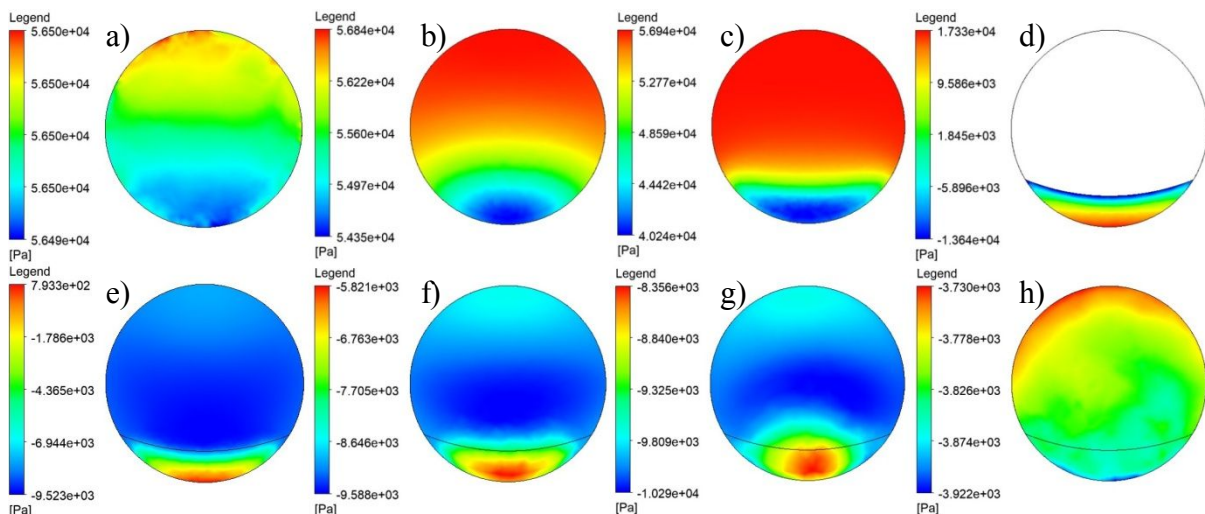
Postotak zatvorenosti zatvarača	v=1 m/s			v=1,5 m/s		
	Max [Pa]	Min [Pa]	Sr [Pa]	Max [Pa]	Min [Pa]	Sr [Pa]
20	895	-1053	171	1983	-2501	355
40	1989	-2689	407	4433	-6057	886
60	7223	-8209	1897	16195	-18347	4228
80	56948	-46156	12890	127831	-103401	29080

Najveće vrijednosti relativnih tlakova pojavljuju se kod najvećeg postotka zatvorenosti zatvarača. Vrijednosti maksimalnih, minimalnih i srednjih relativnih tlakova eksponencijalno rastu s zatvorenošću zatvarača. Prosječan relativni tlak kod zatvarača s 80 % zatvorenosti približno je 75 puta veći nego kod zatvarača s 20 % zatvorenosti. Pretpostavljanje relativnih tlakova za jednake modele s različitim ulaznim brzinama toka fluida na temelju međuodnosa tlakova nije preporučljivo iz razloga što ne postoji jednostavna veza na temelju koje bi se to moglo sprovesti. Dakle, za dobivanje relativnih tlakova pri drukčijoj ulaznoj brzini toka potrebno je promijeniti parametar ulazne brzine, te ponovo procesirati model kako bi se dobili pouzdani rezultati. Na temelju tablice za pretpostaviti je kako će se pri većim postotcima zatvorenosti zatvarača javiti još veći relativni tlakovi do određenog stupnja zatvorenosti kada će se tlakovi smanjivati. Negativna vrijednost minimalnih vrijednosti označava pojavu podtlaka, odnosno pojavu tlaka koji je niži od atmosferskog tlaka, odnosno u ovom slučaju referentnog tlaka. U nastavku je prikazano u kojem dijelu cijevi dolazi do pojave podtlaka. Vrijednosti koje je potrebno analizirati prilikom dimenzioniranja zatvarača u ovisnosti o tlaku su maksimalni i minimalni tlakovi. Pretpostavka je kako će se maksimalne vrijednosti pojaviti pri najvećem postotku zatvorenosti zatvarača, npr. 99 % zatvorenosti. Pitanje tlakova je veoma bitno zbog toga što pri pojavi ekstremnih maksimalnih i minimalnih tlakova može doći do širenja, odnosno stezanja same cijevi, što može dovesti do njenog oštećenja i pucanja. Slikom 63. je prikazano grafičko sučelje postprocesiranja rezultata za podmodel pločastog zatvarača s 80 % zatvorenosti i ulaznom brzinom toka od 1,5 m/s. Na lijevoj strani slike vidljive su maksimalne i minimalne vrijednosti relativnog tlaka za odabrani poprečni profil 4 koji prolazi kroz pločasti zatvarač. Na desnom dijelu slike vidljiv je grafički prikaz raspodjele relativnih tlakova na odabranom profilu uz pripadajuću legendu. Tamno plavom bojom označena su područja minimalnih relativnih tlakova, odnosno podtlaka, dok su maksimalne vrijednosti relativnog tlaka od 38778,8 Pa prikazane crvenom bojom. Podtlak se javlja uz donju stijenku tijela pločastog zatvarača, dok se najveći tlak javlja pri dnu cijevi.



Slika 63. Sučelje postprocesiranja s profilom relativnih tlakova na pločastom zatvaraču za podmodel s 80 % zatvorenosti zatvarača i ulaznom brzinom od 1,5 m/s

Na slici 64. prikazani su u gornjem redu prva 4 poprečna profila relativnih tlakova (a), b), c) i d)) i u donjem redu posljednja 4 poprečna profila relativnih tlakova (e), f) ,g) i h)) za podmodel pločastog zatvarača pri 80 % zatvorenosti s ulaznom brzinom toka od 1 m/s. Uz svaki profil dodana je pripadajuća legenda na temelju koje je moguće približno očitati vrijednost relativnog tlaka u bilo kojoj točki tog profila. Pomoću slike vidljivo je kretanje vrijednosti relativnih tlakova duž cijevi na zadanim profilima.



Slika 64. Raspodjela relativnih tlakova na poprečnim profilima podmodela pločastog zatvarača s 80 % zatvorenosti i ulaznom brzinom od 1 m/s

a) Profil 1, b) Profil 2, c) Profil 3, d) Profil 4, e) Profil 5, f) Profil 6, g) Profil 7, h) Profil 8

Tablicom 9. su prikazane maksimalne, minimalne i srednje vrijednosti relativnih tlakova na poprečnim profilima za sve podmodele i obje ulazne brzine. Sve vrijednosti prikazane su u paskalima (Pa) kako bi se dobio što precizniji dojam o promjeni veličina tlakova na profilima. Na temelju tablice moguće je uočiti kod kojeg se profila javljaju maksimalni relativni tlakovi, i minimalni relativni tlakovi, tj. najveći podtlakovi. Ekstremne vrijednosti označene su podebljanim brojkama za svaki postotak otvorenosti pločastog zatvarača.

Tablica 9. Prikaz vrijednosti maksimalnih, minimalnih i srednjih relativnih tlakova na poprečnim profilima kod modela pločastog zatvarača

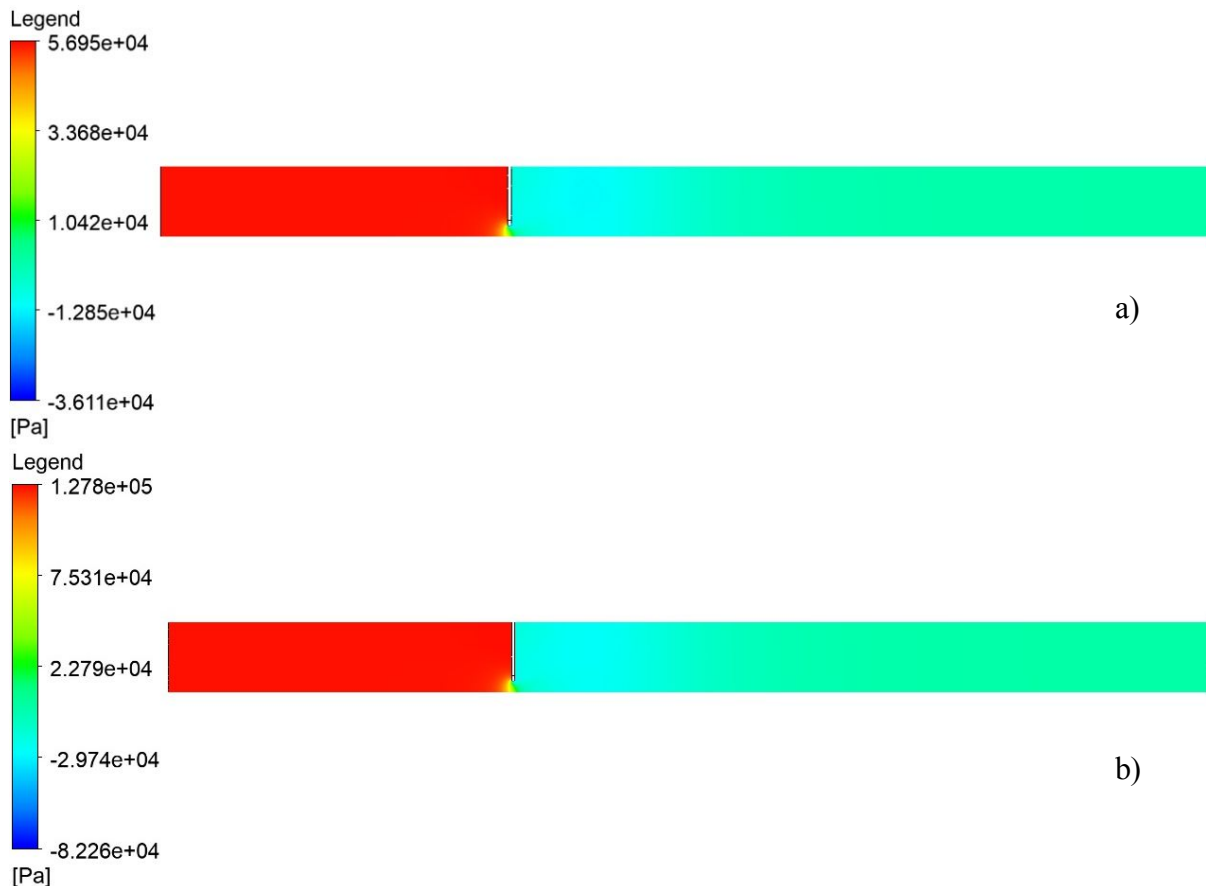
Profil	v=1 m/s											
	20% zatvorenost			40% zatvorenost			60% zatvorenost			80% zatvorenost		
	Max	Min	Sr	Max	Min	Sr	Max	Min	Sr	Max	Min	Sr
1	443	439	441	1538	1534	1536	6773	6769	6771	56499	56495	56497
2	665	261	403	1836	1076	1446	7103	5769	6583	56844	54347	56160
3	870	123	-367	1978	517	1137	7216	3526	5546	56942	40241	52472
4	48	-582	-230	178	-1548	-791	1834	-3759	-1782	17326	-13637	-3976
5	-21	-623	-343	-185	-1430	-1035	141	-3221	-2530	793	-9522	-7905
6	-110	-838	-443	-674	-1602	-1272	-1736	-3412	-2970	-5821	-9588	-8699
7	-174	-591	-373	-1185	-1844	-1589	-3098	-3822	-3579	-8856	-10293	-9819
8	97	90	94	-39	-68	-54	-669	-735	-69	-3730	-3922	-3807

Profil	v=1,5 m/s											
	20% zatvorenost			40% zatvorenost			60% zatvorenost			80% zatvorenost		
	Max	Min	Sr	Max	Min	Sr	Max	Min	Sr	Max	Min	Sr
1	951	944	949	3406	3398	3402	15170	15160	15165	126880	126811	126850
2	1459	552	869	4084	2375	3208	15919	12920	14750	127593	121977	126100
3	1924	245	789	4407	1119	2492	16178	7837	12420	127817	90249	117820
4	81	-1377	-568	335	-3549	-1827	4067	-8558	-4071	38779	-30978	-9124
5	-74	-1435	-804	-461	-3254	-2375	-259	-7321	-5755	1715	-21557	-17870
6	-269	-1830	-993	-1563	-3682	-2925	-3962	-7750	-6749	-13093	-21718	-19650
7	-415	-1298	-843	-2698	-4244	-3636	-7016	-8658	-8111	-18727	-23214	-22110
8	188	171	180	-188	-122	-154	-1538	-1686	-1599	-8267	-8721	-8446

Pojave najvećih relativnih tlakova, najvećih podtlakova i najvećih prosječnih relativnih tlakova pojavljuju se kod obje varijante ulaznih brzina toka na jednakim profilima. Maksimalne vrijednosti relativnog tlaka iznose 56,942 kPa za varijantu ulazne brzine 1 m/s, i 127,817 kPa (~1,3 bara) za varijantu ulazne brzine toka 1,5 m/s i pojavljuju se kod podmodela s 80 % zatvorenosti na trećem profilu koji je postavljen 7 cm ispred prednjeg lica diska pločastog zatvarača gledano u smjeru toka fluida. Najveći podtlakovi javljaju se također kod podmodela s 80 % zatvorenosti na četvrtom profilu koji se nalazi na stražnjem licu diska zatvarača. Najveći podtlakovi iznose 13,637 kPa za varijantu s ulaznom brzinom 1 m/s i 30,978 kPa za varijantu s ulaznom brzinom 1,5 m/s. Na dijelu cijevi iza pločastog zatvarača moguća je pojava kavitacije upravo zbog pojava negativnih tlakova. Kavitacija predstavlja nastanak mjehurića ispunjenih parama unutar kapljevine koja struji pri prisutstvu udarnih

tlakova. Najveći srednji relativni tlakovi i najveći vakuum puno su veći kod podmodela s većim postotkom zatvorenosti u odnosu na najveće pri podmodelu s 20 % zatvorenosti. Primjerice vrijednost najvećeg srednjeg relativnog tlaka kod 80 % zatvorenosti gotovo je 120 puta veća nego najveća vrijednost relativnog tlaka kod podmodela s 20 % zatvorenosti. Na osnovu tablice pri povećanju ulazne brzine toka i povećanju postotka zatvorenosti pločastog zatvarača može se očekivati dodatno povećanje relativnih tlakova do određenog stupnja zatvorenosti kada vrijednost maksimalnog tlaka pada u odnosu na vrijednost kod prethodnog postotka zatvorenosti zatvarača. Za obrađene podmodele, maksimalan apsolutni tlak koji se može očekivati unutar cijevi iznosi 2,29 bara za podmodel s 80 % zatvorenosti i ulaznom brzinom toka od 1,5 m/s što je u potpunosti prihvatljiv tlak za vodoopskrbne cijevi.

Na slici 65. su prikazani središnji uzdužni profili s prikazima promjena relativnih tlakova uzduž cijevi za podmodele s 80 % zatvorenosti pločastog zatvarača. Na gornjem dijelu slike (a) prikazan je uzdužni profil kod podmodela s ulaznom brzinom toka od 1 m/s, dok je na donjem dijelu slike (b)) prikazan profil kod podmodela s ulaznom brzinom od 1,5 m/s. Raspodjele totalnih tlakova su identične, dok vrijednosti samih tlakova nisu jednake.

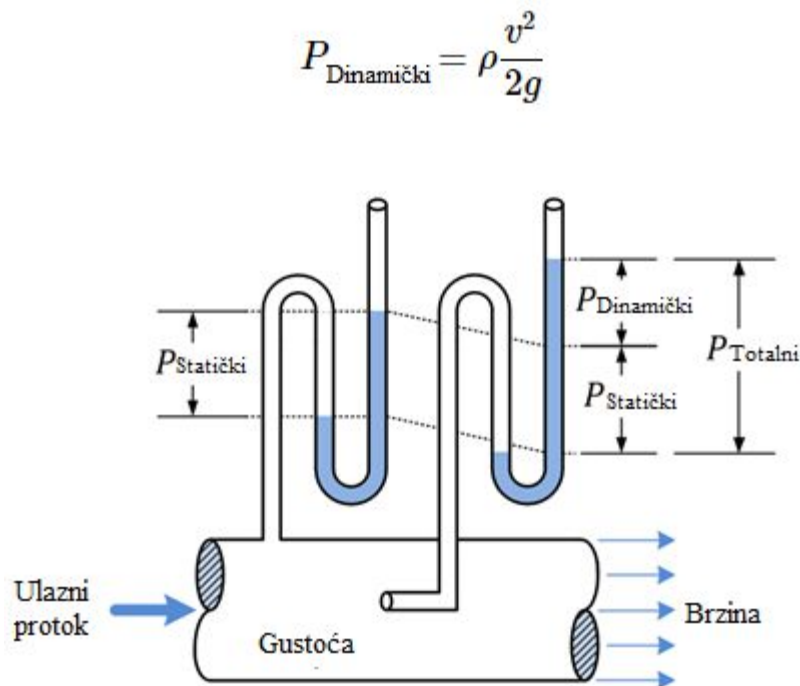


Slika 65. Raspodjela relativnih tlakova na središnjim uzdužnim profilima za podmodel s 80 % zatvorenosti, a) model s ulaznom brzinom 1 m/s, b) model s ulaznom brzinom 1,5 m/s

Maksimalne vrijednosti relativnih tlakova za obje varijante javljaju se na središnjem profilu i iznose 56,948 kPa za varijantu s ulaznom brzinom 1 m/s i 127,831 kPa za varijantu s ulaznom brzinom od 1,5 m/s za podmodel s zatvorenošću zatvarača od 80 %. Minimalne vrijednosti relativnog tlaka prethodno spomenute u tablici 8. ne nalaze se na srednjem uzdužnom profilu. Najveći podtlakovi pojavljuju se u blizini drugog i pretposljednog uzdužnog profila koji se nalaze na 15 mm udaljenosti od stijenke cijevi. Položaj definiranih uzdužnih profila prikazan je na slici 60.

5.1.3. Totalni tlak

Totalni tlak (*eng. total pressure*) unutar Ansysovog programskog paketa, a i u praksi predstavlja sumu relativnog i dinamičkog tlaka. Totalni tlak naziva se i stagnacijski tlak. Razlika između relativnog i totalnog tlaka je dinamički tlak koji predstavlja kinetičku energiju putujućeg fluida [42]. Grafičko pojašnjenje totalnog tlaka dano je slikom 66. na principu cijevi s piezometrom.



Slika 66. Grafičko pojašnjenje totalnog tlaka (modificirano prema [42])

Totalni tlak je izračunat na svim poprečnim i uzdužnim profilima zadanima unutar numeričkog modela, a njegove maksimalne i minimalne vrijednosti unutar cijelog modela izračunate su uz pomoć strujnica (*eng. streamline*) za koje je moguće odabrati bilo koju fizikalnu veličinu za koju želimo dobiti minimalne i maksimalne vrijednosti. Korištenjem tabličnog proračuna unutar ANSYS programskog paketa dobivene su srednje vrijednosti

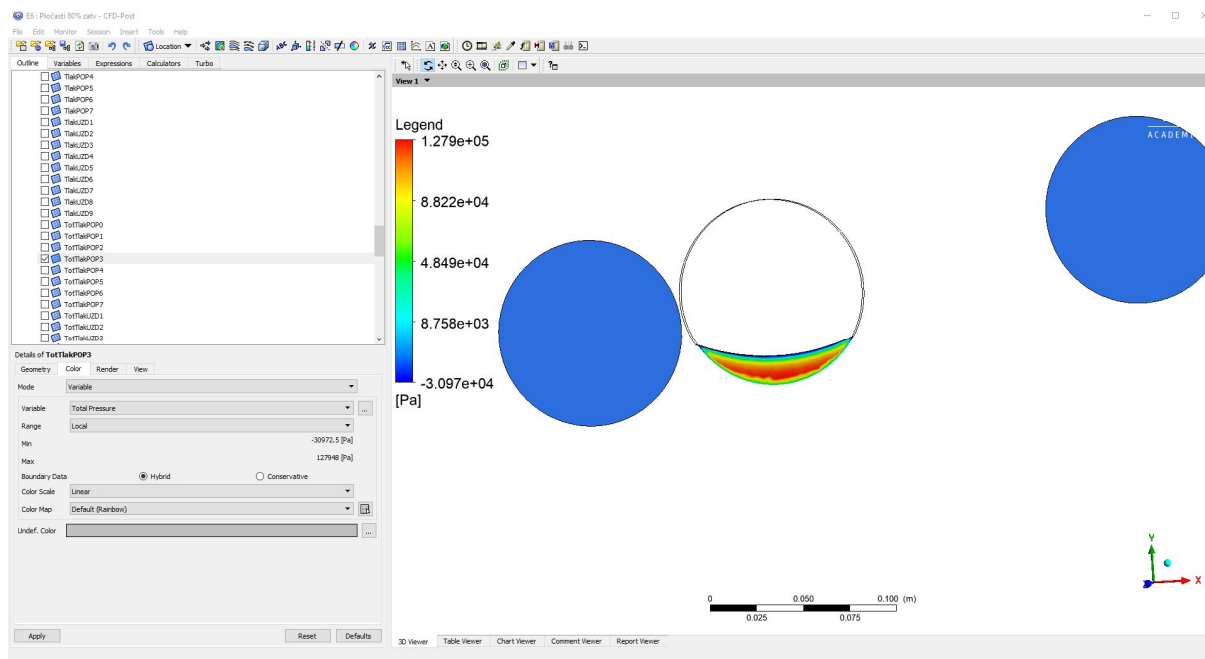
totalnih tlakova za svaki podmodel. Tablicom 10. dane su maksimalne, minimalne i srednje vrijednosti totalnih tlakova unutar svih podmodela za obje varijante ulaznih brzina. Sve su vrijednosti prikazane u paskalima (Pa) kako bi se što vjernije dočarala razlika totalnih tlakova unutar modela.

Tablica 10. Prikaz maksimalnih, minimalnih i srednjih vrijednosti totalnih tlakova za svaki od modela pločastih zatvarača

Postotak zatvorenosti zatvarača	v=1 m/s			v=1,5 m/s		
	Max [Pa]	Min [Pa]	Sr [Pa]	Max [Pa]	Min [Pa]	Sr [Pa]
20	1402	-919	715	3147	-2172	1588
40	3173	-2384	1205	7096	-5372	2683
60	10546	-6897	3626	23801	-15605	8102
80	70524	-36110	19230	158673	-82259	43364

Najveće vrijednosti totalnih tlakova pojavljuju se kod najvećeg postotka zatvorenosti zatvarača. Vrijednosti maksimalnih, minimalnih i srednjih totalnih tlakova eksponencijalno rastu s zatvorenošću zatvarača. Prosječan totalni tlak kod zatvarača s 80 % zatvorenosti približno je 27 puta veći nego kod zatvarača s 20 % zatvorenosti. Pretpostavljanje totalnih tlakova za jednake numeričke modele s različitim ulaznim brzinama toka na temelju međuodnosa tlakova nije preporučljivo iz razloga što ne postoji jednostavna veza na temelju koje bi se to moglo sprovesti. Dakle, za dobivanje totalnih tlakova pri drukčijoj ulaznoj brzini toka potrebno je promijeniti parametar ulazne brzine, te ponovo procesirati model kako bi se dobili pouzdani rezultati. Na temelju tablice za pretpostaviti je kako će se pri većim postotcima zatvorenosti zatvarača javiti još veći totalni tlakovi do određenog stupnja zatvorenosti, kada će se vrijednosti smanjivati. Također može se pretpostaviti kako će za jednaku geometriju uz povećanje ulazne brzine totalni tlakovi rasti zbog povećanja brzine unutar cijevi. Negativna vrijednost totalnog tlaka označava pojave vrijednosti totalnih tlakova koje su niže od vrijednosti referentnog tlaka zadanog u početku, odnosno pojavu totalnog tlaka koji je niži od atmosferskog tlaka. U nastavku je na temelju vrijednosti tlakova na poprečnim profilima prikazano u kojem dijelu cijevi dolazi do javljanja maksimalnih i minimalnih vrijednosti totalnih tlakova. Vrijednosti koje je potrebno analizirati prilikom dimenzioniranja zatvarača u ovisnosti o tlaku su maksimalni i minimalni tlakovi na i u blizini zatvarača. Pretpostavka je kako će se maksimalne vrijednosti pojaviti pri najvećem postotku zatvorenosti zatvarača, npr. 99 % zatvorenosti. Pitanje tlakova je veoma bitno zbog toga što pri pojavi ekstremnih maksimalnih i minimalnih tlakova može doći do širenja odnosno stezanja same cijevi, što može dovesti do njenog oštećenja i pucanja. Uspoređujući tablicu 10. i tablicu 8. vidljivo je kako su totalni tlakovi veći od relativnih. Razlika između tih vrijednosti

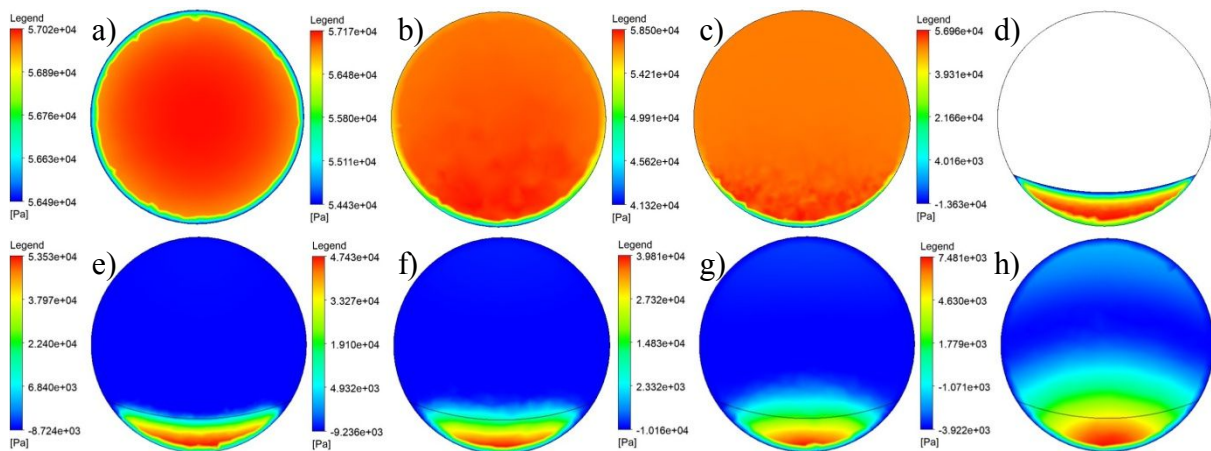
predstavlja dinamički tlak koji u našem slučaju ovisi o brzini toka vode koja nije jednaka za svaki postotak otvorenosti pločastog zatvarača, pa iz tog razloga vrijednosti razlika relativnih i totalnih tlakova variraju i nisu jednake za svaki postotak otvorenosti zatvarača. Slikom 67. je prikazano grafičko sučelje postprocesiranja rezultata s podmodelom pločastog zatvarača s 80 % zatvorenosti i ulaznom brzinom toka od 1,5 m/s. Na lijevoj strani slike vidljive su maksimalne i minimalne vrijednosti totalnog tlaka za odabrani poprečni profil 4 koji prolazi kroz zatvarač. Na desnom dijelu slike vidljiv je grafički prikaz raspodjele totalnih tlakova na odabranom profilu uz pripadajuću legendu. Tamno plavom bojom označena su područja minimalnih totalnih tlakova, dok su maksimalne vrijednosti totalnog tlaka prikazane crvenom bojom. Negativan totalni tlak se suprotno od relativnog tlaka na promatranom profilu javlja uz gornju stijenku tijela pločastog zatvarača, dok se najveći totalni tlak javlja u donjoj polovici protočne površine ispod zatvarača i iznosi 127,95 kPa. Niže vrijednosti totalnih tlakova prikazane su hladnijim bojama (nijanse plave), dok su veće vrijednosti prikazane toplijim bojama (žuta i crvena).



Slika 67. Sučelje postprocesiranja s profilom totalnih tlakova na pločastom zatvaraču za podmodel s 80 % zatvorenosti i ulaznom brzinom od 1,5 m/s

Na slici 68. prikazani su redom u gornjem redu prva 4 poprečna profila totalnih tlakova (a), b), c) i d)) i u donjem redu posljednja 4 poprečna profila totalnih tlakova (e), f), g) i h)) za podmodel pločastog zatvarača pri 80 % zatvorenosti s ulaznom brzinom toka od 1 m/s. Uz svaki profil dodana je pripadajuća legenda na temelju koje je moguće približno očitati vrijednost relativnog tlaka u bilo kojoj točki tog profila. Pomoću slike vidljivo je kretanje

vrijednosti totalnih tlakova duž cijevi na zadanim profilima. Prikazi relativnih i totalnih tlakova na poprečnim profilima nisu jednaki zbog toga što vrijednosti totalnih tlakova ovise o brzinama toka, pa su iz tog razloga u području prije zatvarača totalni tlakovi jednoliki po cijeloj površini poprečnog profila zbog jednolike brzine toka fluida na tom području, izuzevši dio uz stijenku cijevi. To naime nije slučaj u profilima iza zatvarača (e), f), g) i h)) jer su ondje brzine toka većih vrijednosti na različitim dijelovima svakog profila. Na zadnjem poprečnom profilu (h)) koji je udaljen od zatvarača vidljivo je veće širenje većih vrijednosti totalnog tlaka iz razloga što brzine toka postaju konstantnije na površini poprečnog profila, pa samim time i razlike vrijednosti totalnih tlakova na samom profilu postaju manje.



Slika 68. Raspodjela totalnih tlakova na poprečnim profilima podmodela pločastog zatvarača s 80 % zatvorenosti i ulaznom brzinom od 1 m/s

a) Profil 1, b) Profil 2, c) Profil 3, d) Profil 4, e) Profil 5, f) Profil 6, g) Profil 7, h) Profil 8

Tablicom 11. su prikazane maksimalne, minimalne i srednje vrijednosti totalnih tlakova na poprečnim profilima za sve podmodele pločastog zatvarača i obje ulazne brzine toka. Sve vrijednosti prikazane su u paskalima (Pa) kako bi se dobio što precizniji dojam o promjeni veličina tlakova na profilima. Na temelju tablice moguće je uočiti kod kojeg se profila javljaju maksimalni i minimalni totalni tlakovi. Ekstremne vrijednosti totalnih tlakova označene su podebljanim brojkama za svaki postotak otvorenosti pločastog zatvarača kako bi se jednostavnije uočile ekstremske vrijednosti.

Tablica 11. Prikaz vrijednosti maksimalnih, minimalnih i srednjih totalnih tlakova na poprečnim profilima kod modela pločastog zatvarača

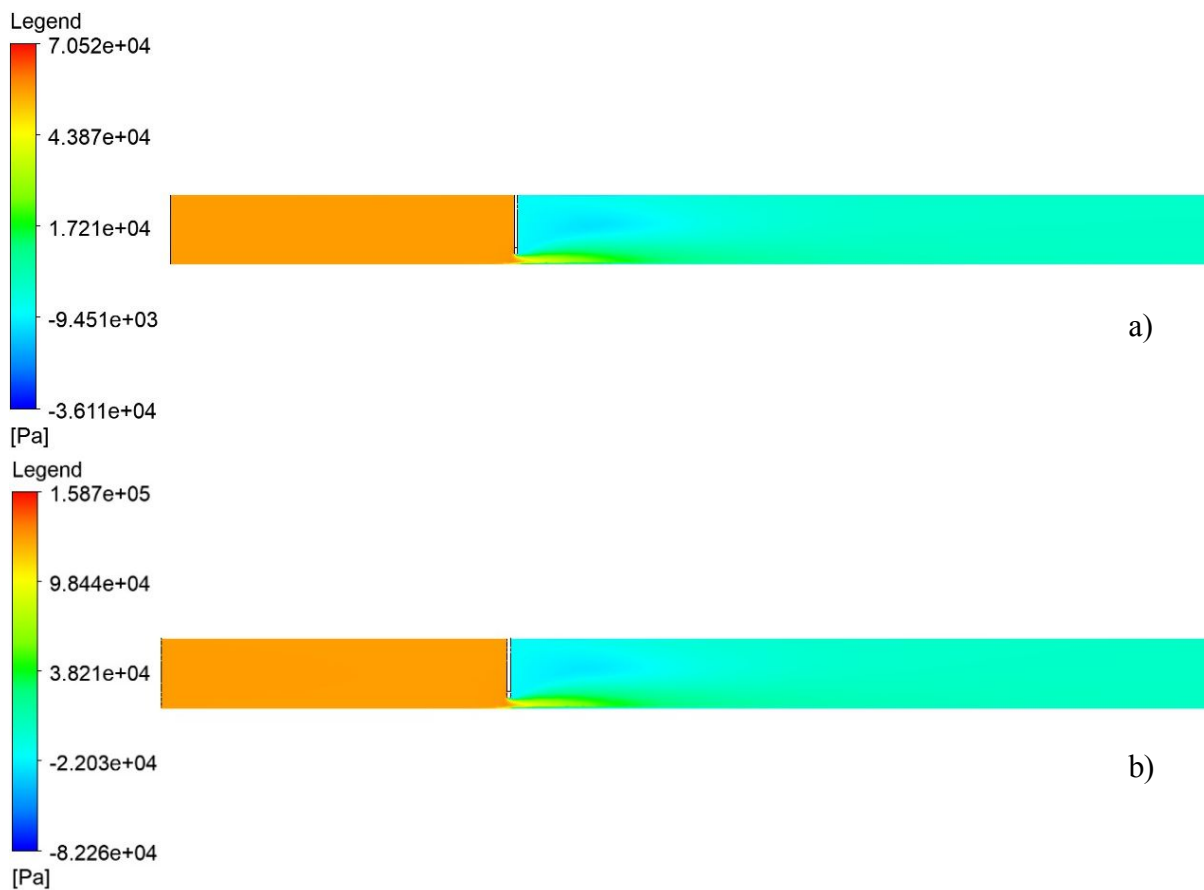
Profil	v=1 m/s											
	20% zatvorenost			40% zatvorenost			60% zatvorenost			80% zatvorenost		
	Max	Min	Sr	Max	Min	Sr	Max	Min	Sr	Max	Min	Sr
1	969	439	929	2063	1534	2023	7298	6769	7258	57023	56495	56980
2	951	263	905	2064	1084	2007	7336	5495	7253	57169	54428	57000
3	968	130	919	2111	559	2036	7494	3770	7318	58504	41319	57300
4	956	-582	397	2071	-1548	431	7398	-3759	1817	56963	-13633	21940
5	941	-614	280	2057	-1388	-147	7307	-3088	-336	53531	-8724	405
6	928	-828	332	2026	-1576	63	7078	-3330	-235	47434	-9236	-7460
7	910	-557	378	1943	-1843	-28	6611	-3777	-624	39812	-10161	-2163
8	760	90	586	1191	-68	520	2423	-735	286	7481	-3922	-854

Profil	v=1,5 m/s											
	20% zatvorenost			40% zatvorenost			60% zatvorenost			80% zatvorenost		
	Max	Min	Sr	Max	Min	Sr	Max	Min	Sr	Max	Min	Sr
1	2127	944	2048	4581	3398	4501	16342	15161	16260	127982	126800	127900
2	2094	557	2001	4590	2394	4471	16437	12977	16265	128330	122160	128000
3	2138	261	2032	4701	1214	4536	16793	8423	16405	131367	92675	128600
4	2104	-1377	841	4613	-3549	933	16603	-8558	4033	127948	-30973	49230
5	2074	-1413	586	4585	-3146	-71	16401	-7009	-812	120316	-19769	834
6	2048	-1810	727	4519	-3587	98	15907	-7558	-583	106722	-20861	-1750
7	2009	1229	827	4342	-4242	-98	14886	-8564	-1452	89734	-22890	-4901
8	1692	171	1293	2678	-188	1146	5504	-1686	622	16847	-8721	-1927

Pojave najvećih i najmanjih totalnih tlakova i najvećih prosječnih totalnih tlakova pojavljuju se kod obje varijante ulaznih brzina na jednakim profilima. Na temelju tog dozvoljeno je pretpostaviti kako će se ekstremne vrijednosti totalnih (ukupnih) tlakova za poprečne profile javiti na jednakim profilima. Maksimalne vrijednosti totalnog tlaka iznose 58,504 kPa za varijantu ulazne brzine 1 m/s, i 131,367 kPa za varijantu ulazne brzine 1,5 m/s i pojavljuju se kod podmodela s 80 % zatvorenosti na trećem profilu koji je postavljen 7 cm ispred prednjeg lica diska pločastog zatvarača gledano u smjeru toka fluida. Najniži totalni tlakovi javljaju se također kod podmodela s 80 % zatvorenosti na četvrtom profilu koji se nalazi na stražnjem licu diska zatvarača. Najniže vrijednosti totalnih tlakova iznose -13,633 kPa za varijantu s ulaznom brzinom 1 m/s i -30,973 kPa za varijantu s ulaznom brzinom toka od 1,5 m/s. Gotovo jednake vrijednosti maksimalnih i minimalnih relativnih tlakova, odnosno podtlakova javljaju se na istim profilima. Razlog tome je mali utjecaj dinamičkog tlaka u području profila ispred i na samom pločastom zatvaraču. Najveći srednji totalni tlakovi i najniži totalni tlakovi puno su veći kod podmodela s većim postotkom zatvorenosti u odnosu na najveće pri podmodelu s 20 % zatvorenosti, primjerice vrijednost najvećeg srednjeg totalnog tlaka kod 80 % zatvorenosti gotovo je 62 puta veća nego najveća vrijednost prosječnog totalnog tlaka kod podmodela s 20 % zatvorenosti. Usporedbe radi, odnos maksimalnih relativnih tlakova za iste slučajeve iznosio je čak 120. Na osnovu tablice pri

povećanju ulazne brzine toka i povećanju postotka zatvorenosti zatvarača može se očekivati dodatno povećanje totalnih tlakova do određenog stupnja zatvorenosti kada vrijednost maksimalnog tlaka pada u odnosu na vrijednost kod prethodnog postotka zatvorenosti zatvarača.

Na slici 69. su prikazani središnji uzdužni profili s prikazima promjena totalnih tlakova uzduž cijevi za podmodele s 80 % zatvorenosti pločastog zatvarača. Na gornjem dijelu slike (a)) prikazan je uzdužni profil kod podmodela s ulaznom brzinom toka od 1 m/s, dok je na donjem dijelu slike (b)) prikazan je profil kod podmodela s ulaznom brzinom toka od 1,5 m/s. Raspodjele totalnih tlakova su identične, dok vrijednosti samih tlakova nisu jednake.



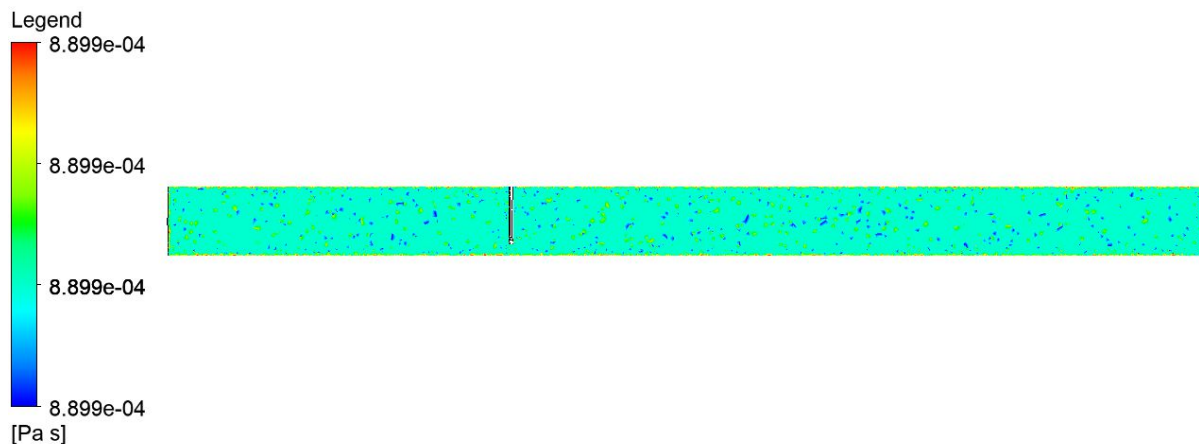
Slika 69. Raspodjela totalnih tlakova na središnjim uzdužnim profilima za podmodel pločastog zatvarača s 80 % zatvorenosti: a) model s ulaznom brzinom toka 1 m/s, b) model s ulaznom brzinom toka 1,5 m/s

Maksimalne vrijednosti totalnih tlakova za obje varijante javljaju se na središnjem uzdužnom profilu i iznose 70,524 kPa za varijantu s ulaznom brzinom 1 m/s i 158,637 kPa za varijantu s ulaznom brzinom od 1,5 m/s za pomodel sa zatvorenošću zatvarača od 80 %.

Minimalne vrijednosti totalnog tlaka prethodno spomenute u tablici 10. također se nalaze na središnjem uzdužnom profilu i iznose -36,110 kPa za varijantu s ulaznom brzinom 1 m/s i -82,259 kPa za varijantu s ulaznom brzinom od 1,5 m/s za podmodel s zatvorenošću zatvarača od 80 %.

5.1.4. Dinamička viskoznost

Dinamička viskoznost, također poznata kao apsolutna viskoznost i koeficijent viskoznosti η je mjera unutarnjeg otpora fluida pri toku. Njena vrijednost mjeri se u paskalsekundama (Pas). Dinamička viskoznost daje podatak o tome kolika je slika potrebna kako bi promatrani fluid tekao pri određenoj brzini. Dva fluida mogu imati jednaku dinamičku viskoznost, ali veoma različite kinematičke viskoznosti ovino o gustoći i obrnuto [43]. Koeficijent viskoznosti glicerola na sobnoj temperaturi iznosi 1,4 Pas, vode 0,001 Pas, a zraka $17 \cdot 10^{-6}$ Pas. Dinamička viskoznost se smanjuje s povećanjem temperature, jer toplinsko gibanje smanjuje privlačne međumolekulske sile. Dinamičke viskoznosti različitih stakala, smole i slično, veoma su veliki, u pravilu veći od 109 Pas [44]. Dinamička viskoznost unutar modela pločastih zatvarača konstantna je duž cijelog modela i iznosi 0,000889 Pas jer nema promjene temperature. Primjer vrijednosti dinamičke viskoznosti na središnjem uzdužnom profilu prikazana je na slici 70. Unutar slike nisu sve vrijednosti prikazane jednom bojom iz razloga što elementi mreže u pojedinim dijelovima nisu jednake veličine kao u ostatku mreže. Usprkos razlici u boji, u legendi na lijevom dijelu slike vidljivo je kako su vrijednosti dinamičke viskoznosti jednake kroz cijeli numerički model.



Slika 70. Varijabilnost dinamičke viskoznosti duž numeričkog modela pločastog zatvarača

5.1.5. Vrtložna viskoznost

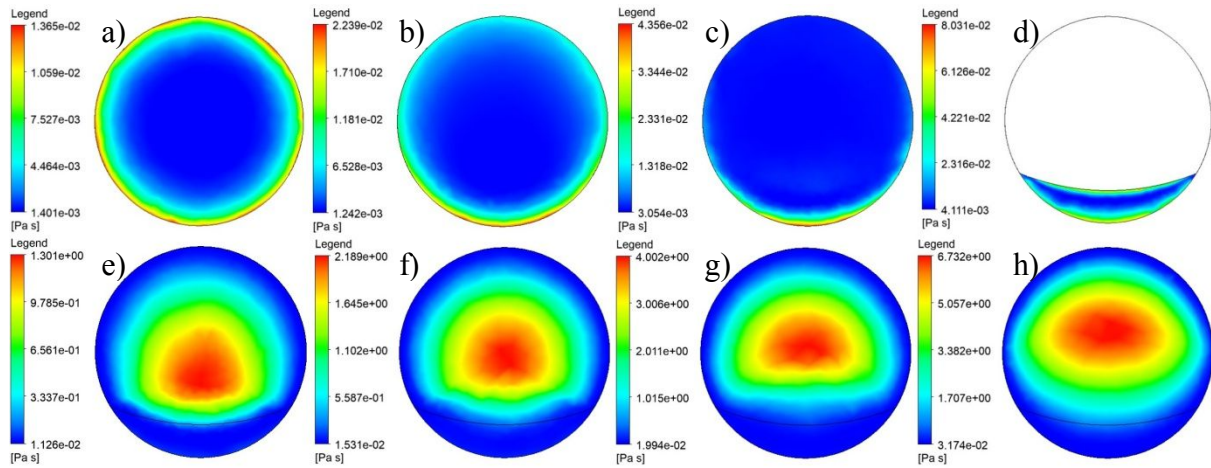
Vrtložna viskoznost je turbulentan prijenos momenata pomoću vrtloga koji povećavaju unutarnje trenje fluida, analogno molekularnoj viskoznosti u laminarnom toku, ali u puno većem razmjeru. Vrtložna viskoznost često se označava simbolom K [45]. Njena vrijednost mjeri se u paskalsekundama (Pas). Tablicom 12. dane su maksimalne, minimalne i srednje vrijednosti vrtložne viskoznosti za svaki numerički podmodel pločastog zatvarača za obje varijante ulaznih brzina. Sve vrijednosti vrtložnih viskoznosti unutar tablice dane su u paskalsekundama (Pas).

Tablica 12. Prikaz maksimalnih, minimalnih i srednjih vrijednosti vrtložne viskoznosti za svaki od numeričkih modela pločastog zatvarača

Postotak zatvorenosti zatvarača	v=1 m/s			v=1,5 m/s		
	Max [Pas]	Min [Pas]	Sr [Pas]	Max [Pas]	Min [Pas]	Sr [Pas]
20	0,04211	0,00070	0,00256	0,62611	0,00105	0,00540
40	1,35284	0,00071	0,02027	1,96034	0,00103	0,03056
60	2,69199	0,00074	0,07082	4,20295	0,00094	0,11740
80	5,63188	0,00077	0,41810	8,99874	0,00088	0,71140

Uočljivo je kako se maksimalne vrtložne viskoznosti javljaju kod numeričkog modela s većom ulaznom brzinom toka fluida i kod podmodela s najvećim postotkom zatvorenosti pločastog zatvarača. Naime, vrtložna viskoznost ovisi o brzini toka, pa su dobiveni očekivani rezultati, kod manje otvorenosti zatvarača javljaju se veće brzine zbog manje protočne površine, pa su samim time i vrtložne viskoznosti veće kod tih podmodela. Najveća vrtložna viskoznost unutar obrađenih podmodela iznosi 8,99 Pas za podmodel s 80 % zatvorenosti i ulaznom brzinom toka od 1,5 m/s, dok za isti podmodel s ulaznom brzinom toka od 1 m/s iznosi 5,63 Pas. Razlike maksimalnih, minimalnih i srednjih vrijednosti između podmodela s 80 % zatvorenosti i početnog podmodela s 20 % zatvorenosti su velike, na temelju čega se može reći kako vrijednost eksponencijalno raste. Primjerice, srednja vrijednost vrtložne viskoznosti kod podmodela s 80 % zatvorenosti zatvarača 163 puta je veća u usporedbi s podmodelom s 20 % zatvorenosti pri jednakoj ulaznoj brzini toka. Teško je na temelju dobivenih rezultata predvidjeti kolika je očekivana vrtložna viskoznost za neki drukčiji podmodel ili za iste podmodele s različitim ulaznim brzinama toka, iz razloga što ne postoji jednostavna veza između dobivenih rezultata. Ono što se može pretpostaviti je da će se pri većim ulaznim brzinama toka za jednake podmodele pojaviti veće vrijednosti vrtložne viskoznosti. Nužno je promatrati maksimalne vrijednosti vrtložnih viskoznosti, jer pri većim vrijednostima dolazi do pojave vrtloga unutar modela što može utjecati na tok fluida i eventualno deformiranje cijevi. Na slici 71. su prikazane vrijednosti vrtložnih viskoznosti na

poprečnim profilima podmodela s 80 % zatvorenosti i ulaznom brzinom toka 1,5 m/s iz razloga što se kod spomenutog podmodela javljaju najveće vrijednosti vrtložne viskoznosti. Na gornjem dijelu slike prikazana su tri profila prije zatvarača (a), b), c)) i jedan na zatvaraču (d), a na donjem dijelu slike profili koji se nalaze iza zatvarača (e), f), g) i h)).



Slika 71. Raspodjela vrtložne viskoznosti na poprečnim profilima podmodela pločastog zatvarača s 80 % zatvorenosti i ulaznom brzinom toka od 1,5 m/s

a) Profil 1, b) Profil 2, c) Profil 3, d) Profil 4, e) Profil 5, f) Profil 6, g) Profil 7, h) Profil 8

Na temelju poprečnih profila s prikazima vrtložnih viskoznosti vidljivo je kako se vrtlozi pojavljuju u području cijevi neposredno iza zatvarača pri sredini cijevi. Centar vrtloga na profilu iza zatvarača pojavljuje se malo ispod središnje osi cijevi, dok se kasnije udaljavanjem od zatvarača centar vrtloga pomiče u smjeru suprotnom smjeru sile gravitacije. Također je moguće uočiti kako u nastavku područja gdje je otvor ispod zatvarača nema pojava velikih vrijednosti vrtložne viskoznosti, već se veće vrijednosti javljaju u području iznad otvora zatvarača. U nastavku su u tablici 13. prikazane maksimalne, minimalne i srednje vrijednosti vrtložnih viskoznosti na poprečnim profilima za sve podmodele i obje ulazne brzine. Sve vrijednosti prikazane su u paskalsekundi (Pas). Na temelju tablice moguće je uočiti kod kojeg se profila pojavljuju maksimalne vrijednosti vrtložne viskoznosti. Ekstremne vrijednosti označene su podebljanim brojkama za svaki postotak otvorenosti pločastog zatvarača kako bi se jednostavnije uočile ekstremlne vrijednosti.

Tablica 13. Prikaz vrijednost maksimalnih, minimalnih i srednjih vrijednost vrtložne viskoznosti na poprečnim profilima modela pločastog zatvarača

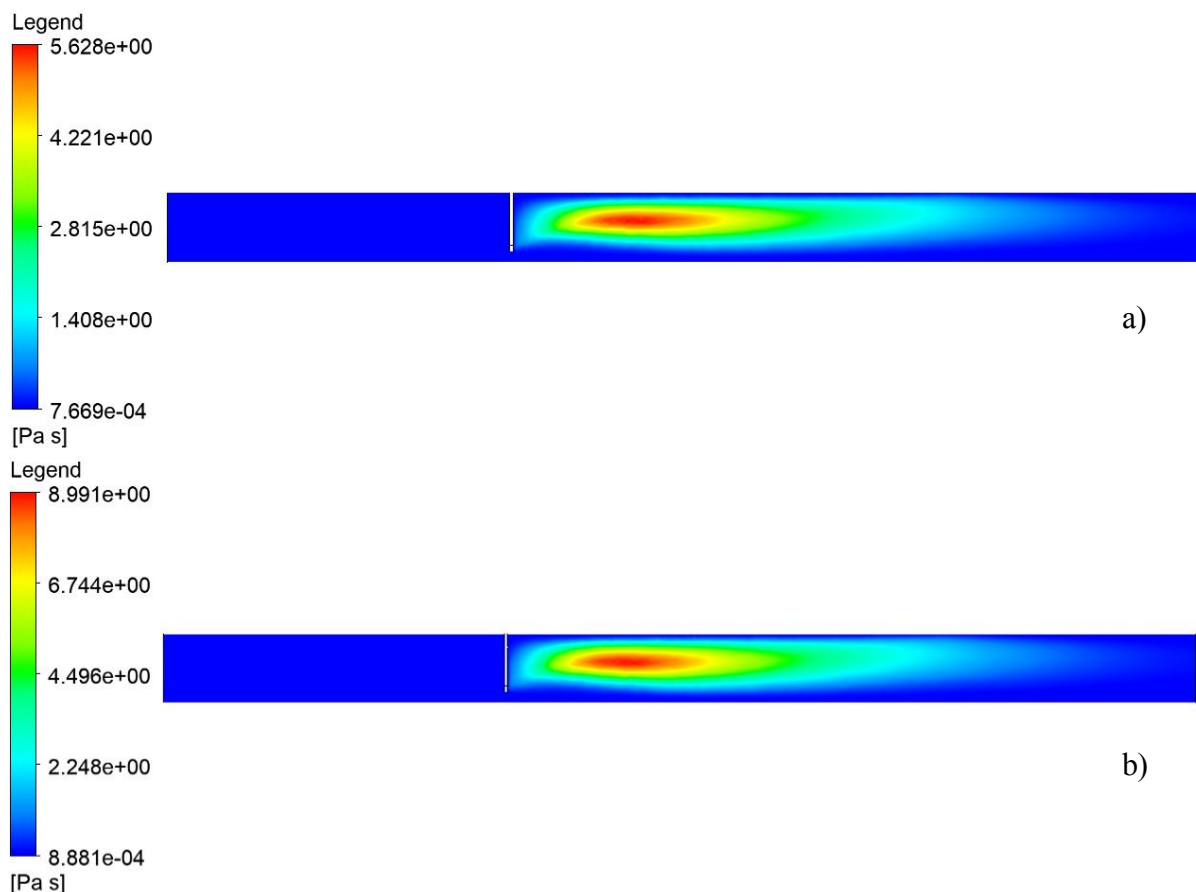
Profil	v=1 m/s											
	20% zatvorenost			40% zatvorenost			60% zatvorenost			80% zatvorenost		
	Max	Min	Sr	Max	Min	Sr	Max	Min	Sr	Max	Min	Sr
1	0,00971	0,00104	0,00373	0,01230	0,00103	0,00384	0,00953	0,00102	0,00380	0,00977	0,00103	0,00383
2	0,01048	0,00074	0,00371	0,01172	0,00076	0,00376	0,01331	0,00076	0,00379	0,01606	0,00083	0,00393
3	0,01130	0,00074	0,00335	0,01429	0,00080	0,00330	0,01990	0,00094	0,00364	0,03128	0,00199	0,00441
4	0,01177	0,00073	0,00487	0,03583	0,00078	0,00932	0,03832	0,00097	0,01012	0,05044	0,00273	0,01470
5	0,01286	0,00072	0,00482	0,31956	0,00083	0,07355	0,45563	0,00177	0,12060	0,77822	0,00748	0,21620
6	0,03718	0,00072	0,00660	0,67398	0,00161	0,11120	0,87058	0,00525	0,17120	1,31854	0,00995	0,29030
7	0,02791	0,00084	0,00639	1,21257	0,00371	0,18680	1,71660	0,01007	0,31290	2,44582	0,01244	0,47420
8	0,01119	0,00092	0,00377	0,45487	0,00559	0,08274	1,67549	0,00914	0,39040	4,36702	0,02144	1,12100

Profil	v=1,5 m/s											
	20% zatvorenost			40% zatvorenost			60% zatvorenost			80% zatvorenost		
	Max	Min	Sr	Max	Min	Sr	Max	Min	Sr	Max	Min	Sr
1	0,01356	0,00141	0,00526	0,01724	0,00140	0,00541	0,01329	0,00140	0,00535	0,01365	0,00140	0,00540
2	0,01462	0,00109	0,00525	0,01635	0,00112	0,00530	0,01857	0,00112	0,00534	0,02239	0,00124	0,00554
3	0,01576	0,00109	0,00471	0,01994	0,00120	0,00460	0,02776	0,00142	0,00507	0,04356	0,00305	0,00617
4	0,04171	0,00108	0,00848	0,05090	0,00112	0,01223	0,05793	0,00145	0,01439	0,08031	0,00411	0,02200
5	0,27364	0,00108	0,04762	0,48419	0,00122	0,11270	0,73171	0,00262	0,19470	1,30087	0,01126	0,37090
6	0,56997	0,00114	0,06458	1,00455	0,00242	0,16880	1,38198	0,00791	0,27560	2,18878	0,01531	0,49710
7	0,54203	0,00167	0,06407	1,76824	0,00553	0,27990	2,68461	0,01513	0,50080	4,00163	0,01994	0,80590
8	0,01574	0,00267	0,00678	0,70183	0,00841	0,12770	2,63531	0,01374	0,62460	6,73153	0,03174	1,78000

Maksimalna vrijednost vrtložne viskoznosti javlja se na posljednjem profilu podmodela s 80 % zatvorenosti i ulaznom brzinom od 1,5 m/s i iznosi 6,73 Pas što nije maksimalna vrijednost unutar cijelog numeričkog modela koja kao što je vidljivo iz tablice 12. iznosi 8,99 Pas. Dakle, najveća vrtložna viskoznost javlja se u području iza posljednjeg korisnički definiranog poprečnog profila kod podmodela s 80 % zatvorenosti zatvarača i ulaznom brzinom toka od 1,5 m/s. Ekstremne vrijednosti maksimuma, minimuma i prosjeka javljaju se na jednakim profilima za obje varijante ulaznih brzina toka, pa je na temelju toga moguće zaključiti da će se najveće vrijednosti vrtložne viskoznosti za jednake podmodele s nekom drugom ulaznom brzinom javiti na jednakim profilima za pojedine stupnjeve otvorenosti zatvarača. Uspoređujući podmodele jednakih varijanti uočljivo je kako se ekstremi ne javljaju na istim profilima, već zatvorenost zatvarača ima veliki utjecaj na mjesto pojave vrtloga i na njegovu duljinu, gledano po duljini cijevi. Kod podmodela s manjim stupnjem zatvorenosti zatvarača, vrtlozi se javljaju bliže zatvaraču, dok su kod većih stupnjeva zatvorenosti vrtlozi odbačeni, te se javljaju na većoj udaljenosti iza zatvarača.

Na slici 72. su prikazani središnji uzdužni profili s prikazima promjena vrtložne viskoznosti uzduž cijevi za numeričke podmodele s 80 % zatvorenosti pločastog zatvarača. Na

gornjem dijelu slike (a)) prikazan je uzdužni profil kod podmodela s ulaznom brzinom toka od 1 m/s, dok je na donjem dijelu slike (b)) prikazan profil kod podmodela s ulaznom brzinom toka od 1,5 m/s. Raspodjele vrtložnih viskoznosti su identične, dok vrijednosti samih iznosa vrtložnih viskoznosti nisu jednake kao što je vidljivo iz legende na lijevom dijelu slike.



Slika 72. Raspodjela vrtložne viskoznosti na središnjim uzdužnim profilima za podmodel s 80 % zatvorenosti: a) model s ulaznom brzinom toka 1 m/s, b) model s ulaznom brzinom toka 1,5 m/s

Maksimalne vrijednosti vrtložne viskoznosti ne javljaju se točno na središnjem uzdužnom profilu, već su za vrlo malu udaljenost odmaknute od tog profila. Razlog tome je nejednolikost mreže numeričkog modela, pa su maksimalne vrijednosti malo odmaknute od središnjeg profila, iako se sami ekstremi javljaju upravo na središnjem profilu. Maksimalna vrijednost vrtložne viskoznosti unutar modela s 80 % zatvorenosti pločastog zatvarača i ulaznom brzinom od 1,5 m/s iznosi približno 8,999 Pas prema tablici 12., dok na središnjem modelu maksimalna vrijednost iznosi približno 8,991 Pas. Minimalne vrijednosti, također se javljaju na središnjem profilu što je vidljivo uspoređujući minimalne vrijednosti legenda s lijeve strane prethodne slike i vrijednosti iz tablice 12.

5.1.6. Kinetička energija turbulencije

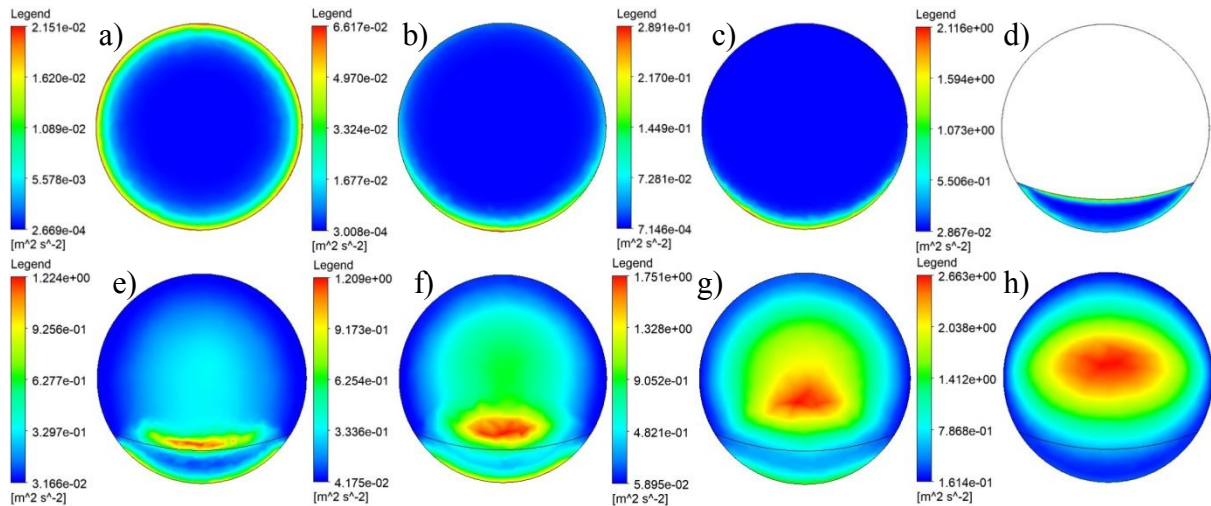
U dinamici fluida, kinetička energija turbulencije (*eng. turbulence kinetic energy – TKE*) je mjera kinetičke energije po jedinici mase koju se povezuje s vrtlozima u turbulentnim tokovima. Prema RANS jednadžbama (*eng. Reynolds-averaged Navier-Stokes equations*) kinetička energija turbulencije može se računati prema turbulentnom modelu. Generalno se računa kao polovica sume varijanca (kvadrat standardnih devijacija) komponenata brzine. Kinetička energija turbulencije se označava slovom k [46]. Njena vrijednost mjeri se u m^2/s^2 ili J/kg . Tablicom 14. dane su maksimalne, minimalne i srednje vrijednosti kinetičke energije turbulencije za svaki podmodel pločastog zatvarača za obje varijante ulaznih brzina. Sve vrijednosti kinetičke energije turbulencije unutar tablice dane su u m^2/s^2 .

Tablica 14. Prikaz maksimalnih, minimalnih i srednjih vrijednosti kinetičke energije turbulencije za svaki od numeričkih modela pločastog zatvarača

Postotak zatvorenosti zatvarača	v=1 m/s			v=1,5 m/s		
	Max [m^2/s^2]	Min [m^2/s^2]	Sr [m^2/s^2]	Max [m^2/s^2]	Min [m^2/s^2]	Sr [m^2/s^2]
20	0,03025	0,00009	0,00126	0,14982	0,00019	0,00296
40	0,22397	0,00010	0,00409	0,48478	0,00022	0,00884
60	0,61771	0,00010	0,01563	1,43669	0,00021	0,03717
80	2,42378	0,00010	0,16300	5,52273	0,00022	0,41070

Maksimalna vrijednost kinetičke energije turbulencije se javlja kod podmodela s većom ulaznom brzinom i iznosi $5,522 \text{ m}^2/\text{s}^2$, odnosno J/kg za podmodel s 80 % zatvorenosti zatvarača. Kod istog podmodela javlja se također i najveća minimalna vrijednost kinetičke energije turbulencije i iznosi $0,00022 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Vrijednost ekstrema kinetičke energije turbulencije kod podmodela s ulaznim brzinama toka od 1 m/s javlja se na istom podmodelu, a to je podmodel s 80 % zatvorenosti i iznosi $2,42 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Razlog tome je što je varijacija komponenata brzina veća kod varijante s većom ulaznom brzinom za spomenuti podmodel pločastog zatvarača s 80 % zatvorenosti zatvarača. Bitno je spomenuti kako maksimalna srednja vrijednost kod varijante s ulaznom brzinom toka od 1,5 m/s iznosi $0,411 \text{ m}^2/\text{s}^2$, dok maksimalna srednja kod varijante s ulaznom brzinom toka od 1 m/s iznosi samo $0,163 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Temeljem dobivenih rezultata teško je predvidjeti kolika je očekivana vrtložna viskoznost za neki drukčiji podmodel ili za iste podmodele s različitim ulaznim brzinama toka iz razloga što ne postoji jednostavna veza između dobivenih rezultata. Ono što se može pretpostaviti je da će se pri većim ulaznim brzinama za jednake podmodele pojaviti veće vrijednosti kinematičke energije turbulencije. Njihove iznose moguće je jedino približno predvidjeti bez velike preciznosti. Na slici 73. su prikazane vrijednosti kinematičke energije turbulencije na poprečnim profilima podmodela s 80 % zatvorenosti zatvarača i ulaznom brzinom toka od 1,5

m/s iz razloga što se kod spomenutog podmodela javlja najveća vrijednost kinetičke energije turbulencije, iako ta vrijednost nije ujedino i najveća vrijednost unutar cijelog numeričkog modela. Na gornjem dijelu slike prikazana su tri profila prije zatvarača (a), b), c) i jedan na zatvaraču (d)), a na donjem dijelu slike profili (e), f), g), h)) koji se nalaze iza pločastog zatvarača.



Slika 73. Raspodjela kinetičke energije turbulencije na poprečnim profilima podmodela pločastog zatvarača s 80 % zatvorenosti i ulaznom brzinom toka od 1,5 m/s

a) Profil 1, b) Profil 2, c) Profil 3, d) Profil 4, e) Profil 5, f) Profil 6, g) Profil 7, h) Profil 8

Na temelju poprečnih profila s prikazima raspodjele kinetičke energije turbulencije vidljivo je kako se maksimalne vrijednosti kinetičke energije turbulencije javljaju na i iza pločastog zatvarača šireći se od dna stijenke zatvarača prema gornjoj polovici cijevi uzduž toka iza zatvarača. Maksimalna vrijednost koja se pojavljuje na prikazanim profilima iznosi $2,66 \text{ m}^2/\text{s}^2$ na posljednjem poprečnom profilu, što nije ujedno i maksimum unutar cijelog numeričkog modela. Maksimalna vrijednost kinetičke energije turbulencije od $5,52 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ne pojavljuje se ni na jednom korisnički definiranom profilu, već iza posljednjeg profila (h)). U nastavku su u tablici 15. prikazane maksimalne, minimalne i srednje vrijednosti kinetičke energije turbulencije na poprečnim profilima za sve numeričke podmodele i obje ulazne brzine toka. Sve vrijednosti prikazane su u m^2/s^2 . Na temelju tablice moguće je uočiti kod kojeg se profila pojavljuju maksimalne vrijednosti vrtložne viskoznosti. Ekstremne vrijednosti kinetičke energije turbulencije označene su podebljanim brojkama za svaki postotak otvorenosti pločastog zatvarača kako bi se jednostavnije uočile ekestremne vrijednosti.

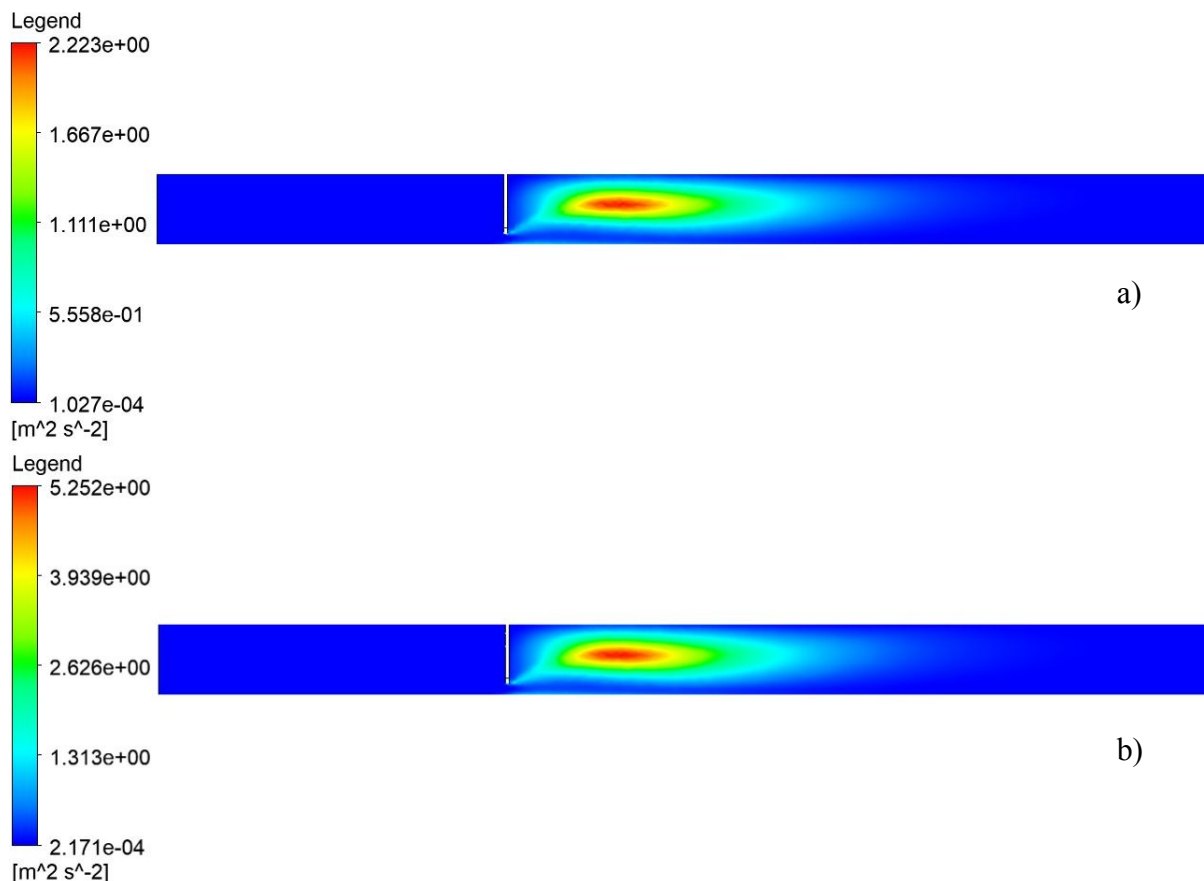
Tablica 15. Prikaz vrijednosti maksimalnih, minimalnih i srednjih vrijednost kinetičke energije turbulencije na poprečnim profilima pločastog zatvarača

Profil	v=1 m/s											
	20% zatvorenost			40% zatvorenost			60% zatvorenost			80% zatvorenost		
	Max	Min	Sr	Max	Min	Sr	Max	Min	Sr	Max	Min	Sr
1	0,01144	0,00014	0,00311	0,01051	0,00014	0,00314	0,01081	0,00014	0,00313	0,01089	0,00014	0,00314
2	0,01356	0,00010	0,00308	0,01716	0,00011	0,00322	0,02147	0,00012	0,00350	0,03406	0,00014	0,00378
3	0,01497	0,00011	0,00243	0,02404	0,00016	0,00273	0,04333	0,00034	0,00384	0,14914	0,00033	0,00949
4	0,02208	0,00011	0,00565	0,05912	0,00022	0,01691	0,16759	0,00092	0,03915	0,88934	0,01319	0,21620
5	0,01968	0,00013	0,00347	0,05966	0,00033	0,01707	0,13125	0,00206	0,03468	0,53885	0,01338	0,10860
6	0,02064	0,00015	0,00482	0,09068	0,00094	0,02597	0,17000	0,00644	0,05021	0,53124	0,01730	0,13810
7	0,02233	0,00021	0,00503	0,18801	0,00256	0,04415	0,29017	0,01401	0,08991	0,69996	0,02282	0,20790
8	0,01337	0,00012	0,00317	0,03227	0,00321	0,01127	0,20445	0,01421	0,06462	1,14978	0,06886	0,35820

Profil	v=1,5 m/s											
	20% zatvorenost			40% zatvorenost			60% zatvorenost			80% zatvorenost		
	Max	Min	Sr	Max	Min	Sr	Max	Min	Sr	Max	Min	Sr
1	0,02268	0,00027	0,00623	0,02073	0,00027	0,00628	0,02135	0,00027	0,00626	0,02151	0,00027	0,00628
2	0,02666	0,00021	0,00617	0,03358	0,00024	0,00642	0,04186	0,00027	0,00698	0,06617	0,00030	0,00751
3	0,02969	0,00023	0,00489	0,04692	0,00035	0,00546	0,08415	0,00074	0,00762	0,28910	0,00071	0,01871
4	0,06786	0,00025	0,01495	0,12699	0,00048	0,03366	0,33137	0,00200	0,08358	2,11641	0,02867	0,47990
5	0,06669	0,00028	0,01783	0,13641	0,00070	0,03853	0,30955	0,00449	0,08088	1,22364	0,03166	0,26990
6	0,13371	0,00040	0,02447	0,19733	0,00206	0,05792	0,40030	0,01428	0,11610	1,20911	0,04175	0,34190
7	0,12998	0,00075	0,02473	0,40703	0,00555	0,09827	0,68619	0,03434	0,21010	1,75139	0,05895	0,52140
8	0,02658	0,00087	0,00666	0,07491	0,00718	0,02506	0,47935	0,03283	0,15270	2,66295	0,16141	0,84520

Maksimalna kinetička energija turbulencije kao što je prethodno spomenuto javlja se na posljednjem profilu podmodela s 80 % zatvorenosti zatvarača i ulaznom brzinom toka od 1,5 m/s i iznosi $2,66 \text{ m}^2/\text{s}^2$ što nije maksimalna vrijednost unutar cijelog numeričkog modela. Dakle, najveća vrijednost kinetičke energije turbulencije javlja se u području iza posljednjeg korisnički definiranog poprečnog profila kod podmodela s 80 % zatvorenosti zatvarača i ulaznom brzinom toka od 1,5 m/s. Ekstremne vrijednosti maksimuma, minimuma i prosjeka ne javljaju se na jednakim profilima za obje varijante ulaznih brzina toka, što je posljedica različitih varijacija brzina toka. Uspoređujući podmodele jednakih varijanti uočljivo je kako se ekstremi ne javljaju na istim profilima, već se mijenjaju odnosno odmiču u smjeru toka fluida u vezi s postotkom zatvorenosti pločastog zatvarača. Povećanjem stupnja zatvorenosti zatvarača maksimalne vrijednosti kinetičke energije turbulencije sve se više udaljavaju od zatvarača što je posljedica povećanja varijacija brzina toka udaljavanjem od zatvarača kod podmodela s manjim postotkom zatvorenosti u usporedbi s većim postotkom zatvorenosti, npr. 60 % zatvorenosti zatvarača. Iz tog se razloga maksimalne vrijednosti kod podmodela s većim postotcima zatvorenosti javljaju iza posljednjeg korisnički definiranog poprečnog profila gledano u smjeru toka vode.

Na slici 74. su prikazani središnji uzdužni profili s prikazima promjena kinetičke energije turbulencije uzduž cijevi za podmodele s 80 % zatvorenosti pločastog zatvarača. Na gornjem dijelu slike (a)) prikazan je uzdužni profil kod podmodela s ulaznom brzinom od 1 m/s, dok je na donjem dijelu slike (b)) prikazan profil kod podmodela s ulaznom brzinom toka od 1,5 m/s. Raspodjele kinetičke energije turbulencije su podjednake, dok vrijednosti samih iznosa nisu jednake kao što je vidljivo iz legende na lijevom dijelu slike.



Slika 74. Raspodjela kinetičke energije turbulencije na središnjim uzdužnim profilima za podmodel s 80 % zatvorenosti pločastog zatvarača: a) model s ulaznom brzinom toka od 1 m/s, b) model s ulaznom brzinom toka od 1,5 m/s

Maksimalne vrijednosti kinetičke energije turbulencije ne javljaju se točno na središnjem uzdužnom profilu, već su za vrlo malu udaljenost odmaknute od tog profila. Razlog toga je što se maksimalne varijacije brzina toka ne javljaju točno na sredini cijevi. Maksimalna vrijednost kinetičke energije turbulencije unutar modela s 80 % zatvorenosti zatvarača i ulaznom brzinom toka od 1,5 m/s iznosi približno $5,52 m^2/s^2$ prema tablici 14., dok na središnjem modelu maksimalna vrijednosti iznosi približno $5,25 m^2/s^2$. Minimalne vrijednosti se javljaju na središnjem profilu (ukoliko se baziramo na preciznost pete decimale) što je vidljivo uspoređujući minimalne vrijednosti legenda s lijeve strane prethodne slike i

vrijednosti iz tablice 14. Pri većim brzinama toka minimalne vrijednosti bi također bile odmaknute od središnjeg profila, te ne bi bilo poklapanja minimalnih vrijednosti unutar cijelog numeričkog modela i vrijednosti minimalne kinetičke energije turbulencije na središnjem uzdužnom profilu.

5.1.7. Mjera deformacije smicanjem

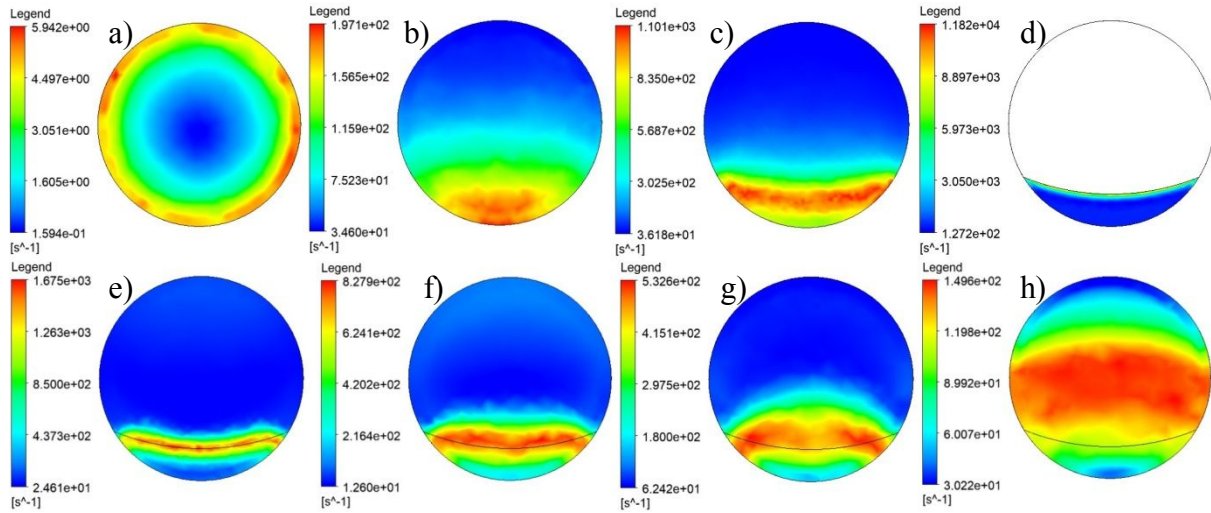
Mjera deformacije smicanjem je skalarna vrijednost koja se označava grčkim slovom gama (γ) i prikazuje se u mjernim jedinicama (s^{-1}). U mehanici fluida mjera deformacije smicanjem nikada nije konstantna za konstantnu deformaciju smicanjem. Mjera deformacije smicanjem proporcionalna je deformaciji smicanjem ukoliko je brzina toka konstantna što kod obrađivanih numeričkih modela nije slučaj. Veća mjera deformacije smicanjem označava da je fluid više deformiran u usporedbi s nižom mjerom deformacije smicanjem pri konstantom vremenu (t) [47]. Mjera deformacije smicanjem kod obrađenih modela ovisi o „struganju“ fluida o zatvarač i o stijenku cijevi. Tablicom 16. dane su maksimalne, minimalne i srednje vrijednosti mjere deformacije smicanjem za svaki podmodel pločastog zatvarača za obje varijante ulaznih brzina toka. Sve vrijednosti kinetičke energije turbulencije unutar tablice dane su u s^{-1} .

Tablica 16. Prikaz maksimalnih, minimalnih i srednjih vrijednosti mjere deformacije smicanjem za svaki od numeričkih modela pločastog zatvarača

Postotak zatvorenosti zatvarača	v=1 m/s			v=1,5 m/s		
	Max [1/s]	Min [1/s]	Sr [1/s]	Max [1/s]	Min [1/s]	Sr [1/s]
20	947,07	0,05	6,04	1468,03	0,06	8,94
40	1460,19	0,05	14,09	2275,53	0,05	20,85
60	3325,13	0,05	33,79	5144,59	0,05	50,92
80	10707,90	0,05	135,00	16144,10	0,07	203,20

Minimalne vrijednosti mjere deformacije smicanjem gotovo su jednake unutar obje varijante za sve postotke zatvorenosti zatvarača i iznose u prosjeku $0,05 s^{-1}$ kod varijante s ulaznom brzinom toka od 1 m/s i $0,06 s^{-1}$ kod varijante s ulaznom brzinom toka od 1,5 m/s. Maksimalne i prosječne vrijednosti eksponencijalno se povećavaju s postotkom zatvorenosti zatvarača. Maksimalna vrijednost mjere deformacije smicanjem iznosi $10707,90 s^{-1}$ kod varijante s ulaznom brzinom toka od 1 m/s i $16144,10 s^{-1}$ kod varijante s ulaznom brzinom toka od 1,5 m/s. Prosječna mjera deformacije smicanjem kod podmodela s 20 % zatvorenosti zatvarača 22 je puta manja nego prosječna mjera deformacije smicanjem kod podmodela s 80 % zatvorenosti za istu ulaznu brzinu. Na slici 75. su prikazane vrijednosti mjere deformacije smicanjem na poprečnim profilima podmodela s 80 % zatvorenosti i ulaznom brzinom toka

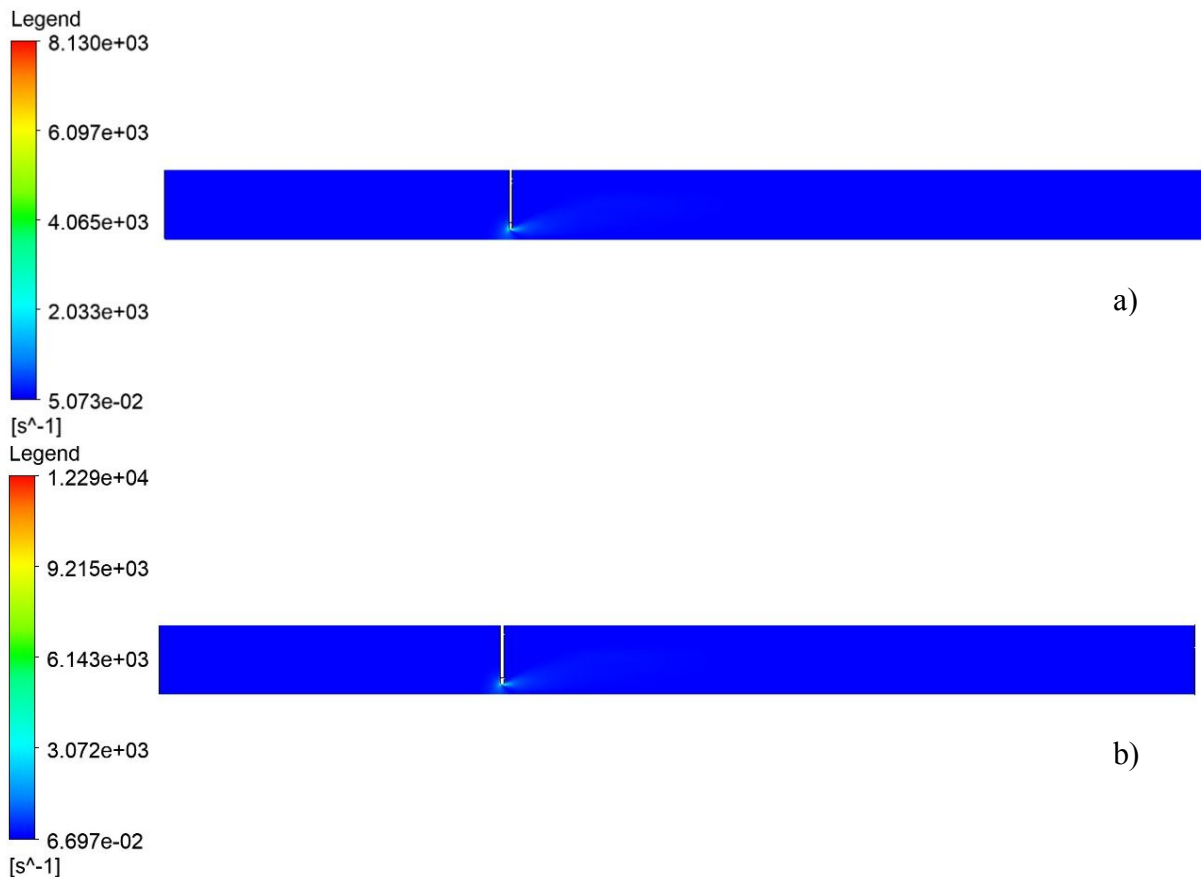
1,5 m/s. Na gornjem dijelu slike prikazana su tri profila prije zatvarača (a), b), c) i jedan na zatvaraču (d)), a na donjem dijelu slike profili (e), f), g), h)) koji se nalaze iza pločastog zatvarača.



Slika 75. Raspodjela mjera posmičnih napreznja na poprečnim profilima podmodela pločastog zatvarača s 80 % zatvorenosti i ulaznom brzinom toka od 1,5 m/s

a) Profil 1, b) Profil 2, c) Profil 3, d) Profil 4, e) Profil 5, f) Profil 6, g) Profil 7, h) Profil 8

Maksimalna vrijednost na prikazanim profilima javlja se na poprečnom profilu zatvarača i iznosi $11819,70 \text{ s}^{-1}$ što nije maksimalna vrijednost unutar cijelog modela već samo na jednom od korisnički definiranih poprečnih profila. Maksimalna vrijednost ne javlja se na korisnički definiranim poprečnim niti uzdužnim profilima. Prilikom toka gotovo konstantnom brzinom kod podmodela a) vidljivo je kako se najveće vrijednosti mjere posmičnih napreznja javljaju uz stijenku cijevi, dok se kasnije to mijenja zbog položaja zatvarača. Za očekivati je kako će se maksimalne vrijednosti posmičnih napreznja javiti na prednjoj ili stražnjoj stijenci ploče zatvarača. Na slici 76. su prikazani središnji uzdužni profili s prikazima promjena mjera posmičnih napreznja uzduž cijevi za podmodele s 80 % zatvorenosti pločastog zatvarača. Na gornjem dijelu slike (a)) prikazan je uzdužni profil kod podmodela s ulaznom brzinom od 1 m/s, dok je na donjem dijelu slike (b)) prikazan profil kod podmodela s ulaznom brzinom toka od 1,5 m/s. Raspodjele mjere posmičnih napreznja su podjednake, dok vrijednosti samih iznosa nisu jednake kao što je vidljivo iz legende na lijevom dijelu slike.

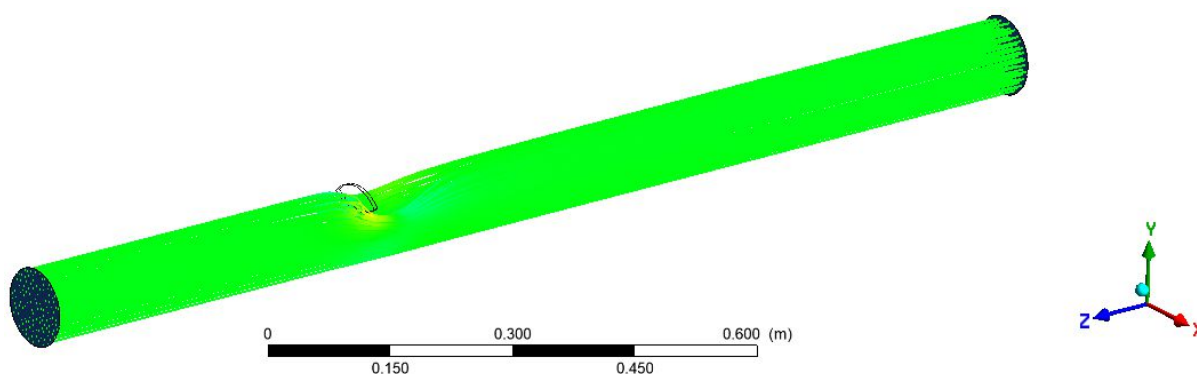


Slika 76. Raspodjela mjere posmičnog naprezanja na središnjim uzdužnim profilima za podmodel pločastog zatvarača s 80 % zatvorenosti: a) model s ulaznom brzinom toka od 1 m/s, b) model s ulaznom brzinom toka od 1,5 m/s

S grafičkog prikaza mjere posmičnog naprezanja na središnjim uzdužnim profilima je teško razaznati točan položaj maksimalnih vrijednosti iz razloga što se te maksimalne vrijednosti javljaju na malom dijelu (na dnu diska zatvarača), dok su na ostalim dijelovima raspodjele većinom jednake kroz cijeli model, pa je grafički teško uočiti na kojim se dijelovima točno dešavaju promjene mjere posmičnog naprezanja. Maksimalne vrijednosti koje se pojavljuju na središnjim profilima iznose $8129,95 \text{ s}^{-1}$ za podmodel pločastog zatvarača s 80 % zatvorenosti i ulaznom brzinom toka od 1 m/s i $12286,50 \text{ s}^{-1}$ za podmodel pločastog zatvarača s 80 % zatvorenosti i ulaznom brzinom toka od 1,5 m/s. Maksimalne vrijednosti na središnjim uzdužnim profilima nisu ujedno i maksimalne vrijednosti unutar cijelog modela. Poziciju maksimalne vrijednosti teško je odrediti, no za pretpostaviti je kako se nalazi na disku zatvarača.

5.1.8. Brzine toka u smjerovima u , v i w

Unutar obrade rezultata u ANSYS Workbench programskom paketu moguće je odabrati prikaz vrijednosti brzina toka u (u smjeru osi x), v (u smjeru osi y) i w (u smjeru osi z). Slikom 77. je prikazan model sa strujnicama. U donjem desnom uglu slike označeni su smjerovi osi x , y i z . Za svaki podmodel smjerovi osi usmjereni su jednakom smjeru kao na slici.



Slika 77. Prikaz strujnicama za brzinu toka uzduž vodoopskrbne cijevi

U nastavku su u tablici 17. dane maksimalne, minimalne i srednje vrijednosti brzina u smjeru u , tablicom 18. u smjeru v i tablicom 19. u smjeru w . Negativan iznos označuje smjer brzine suprotan od pozitivnog smjera osi. Glavni smjer toka, odnosno orijentacije cijevi je negativan smjer osi z , pa zbog toga u pravilu svaka negativna vrijednost brzine u smjeru w zapravo predstavlja brzinu u smjeru glavnog toka, dok one pozitivne u smjeru w predstavljaju brzine u smjeru suprotnom glavom toku. Negativna vrijednost brzine u smjeru v (os y) predstavlja djelovanje brzine u smjeru sile gravitacije, dok pozitivna predstavlja djelovanje brzine u smjeru suprotnom sili gravitacije. Brzina u (u smjeru osi x) najmanje je bitna zbog najmanjeg utjecaja, jer predstavlja brzinu u smjeru kod kojeg se očekuju pojave najmanjih brzina svih smjerova. Razlog tome je što os x siječe cijev paralelno s diskom pločastog zatvarača i u smjeru osi x nema nikakvih dodatnih utjecaja (npr. sila gravitacije ili dodatan bočni dotok).

Tablica 17. Prikaz maksimalnih, minimalnih i srednjih vrijednosti brzine toka u smjeru osi x (brzina u) za svaki od modela pločastog zatvarača

Postotak zatvorenosti zatvarača	v=1 m/s			v=1,5 m/s		
	Max [m/s]	Min [m/s]	Sr [m/s]	Max [m/s]	Min [m/s]	Sr [m/s]
20	0,80908	-0,81111	0,00014	1,21437	-1,22217	0,00067
40	0,92878	-0,94738	0,00052	1,39231	-1,41825	0,00055
60	1,14753	-1,13097	0,00019	1,71779	-1,69491	-0,00045
80	3,04773	-3,26661	-0,00048	4,60593	-4,96604	-0,00389

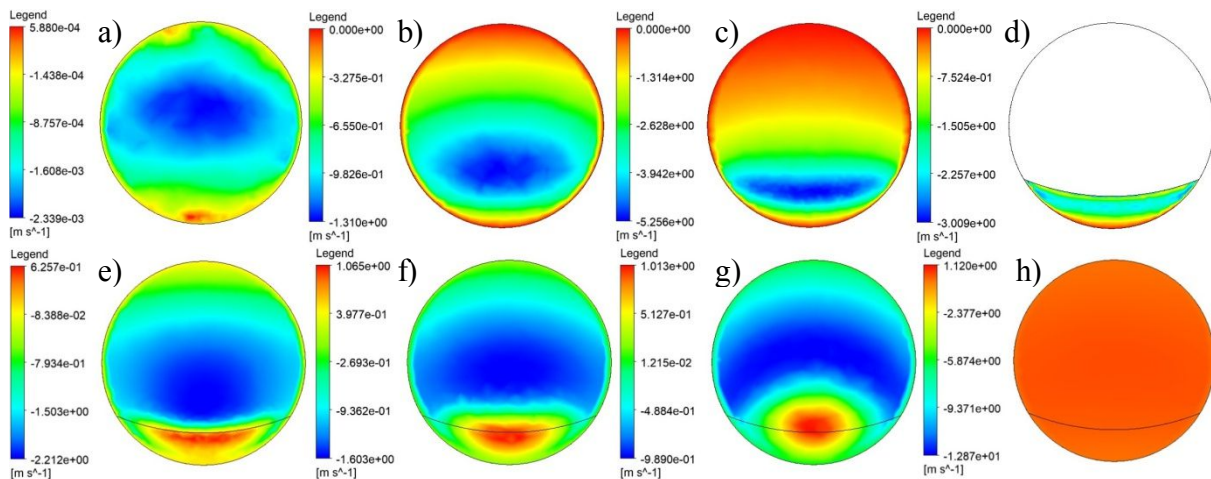
Tablica 18. Prikaz maksimalnih, minimalnih i srednjih vrijednosti brzine toka u smjeru osi y (brzina v) za svaki od modela pločastog zatvarača

Postotak zatvorenosti zatvarača	v=1 m/s			v=1,5 m/s		
	Max [m/s]	Min [m/s]	Sr [m/s]	Max [m/s]	Min [m/s]	Sr [m/s]
20	0,29430	-1,43266	-0,01039	0,41131	-2,17214	-0,01611
40	0,30172	2,19140	0,03671	0,43947	-3,28235	-0,05479
60	0,30677	-3,71673	-0,09290	0,45937	-5,59895	-0,14010
80	1,12191	-8,93049	-0,22620	1,66090	-13,46190	-0,35100

Tablica 19. Prikaz maksimalnih, minimalnih i srednjih vrijednosti brzine toka u smjeru osi z (brzina w) za svaki od modela pločastog zatvarača

Postotak zatvorenosti zatvarača	v=1 m/s			v=1,5 m/s		
	Max [m/s]	Min [m/s]	Sr [m/s]	Max [m/s]	Min [m/s]	Sr [m/s]
20	0,97791	-1,56018	-1,03400	1,39766	-2,32962	-1,55100
40	1,28379	-2,53212	-1,17700	1,93228	-3,79678	-1,76800
60	1,85306	-4,41536	-1,54900	2,77596	-6,63233	-2,32400
80	3,87612	-10,58440	-2,15000	5,83013	-15,88220	-3,22600

Uspoređujući prethodne tablice potvrđena je pretpostavka kako će ekstremne vrijednosti brzine toka u smjeru osi x biti značajno manje od ekstremnih vrijednosti brzina toka u smjeru osi y i z. Najveća brzina se naravno pojavljuje u smjeru osi z (brzina w) s negativnom vrijednosti što predstavlja brzinu fluida u smjeru glavnog toka i spomenuta brzina toka iznosi 15,88 m/s za podmodel pločastog zatvarača s 80 % zatvorenosti s ulaznom brzinom od 1,5 m/s i 10,58 m/s za podmodel s ulaznom brzinom toka od 1 m/s. Najveća brzina u smjeru osi y (brzina v) usmjerena je u suprotnom smjeru od smjera sile gravitacije i iznosi 13,46 m/s za podmodel pločastog zatvarača s 80 % zatvorenosti s ulaznom brzinom od 1,5 m/s i 8,93 m/s za podmodel s ulaznom brzinom toka od 1 m/s. Najveća brzina koja se javlja u smjeru osi x (brzina u) iznosi 4,96 m/s za podmodel pločastog zatvarača s 80 % zatvorenosti i ulaznom brzinom toka od 1,5 m/s i 3,27 m/s za podmodel s ulaznom brzinom toka od 1 m/s. Slikom 78. su prikazani poprečni profili s prikazom vrijednosti brzina u smjeru osi y (brzina v) za podmodel s postotkom zatvorenosti zatvarača od 80 % i ulaznom brzinom toka od 1,5 m/s. Na gornjem dijelu slike prikazana su tri profila prije pločastog zatvarača (a), b), c) i jedan na zatvaraču (d)), a na donjem dijelu slike profili (e), f), g), h)) koji se nalaze iza pločastog zatvarača.



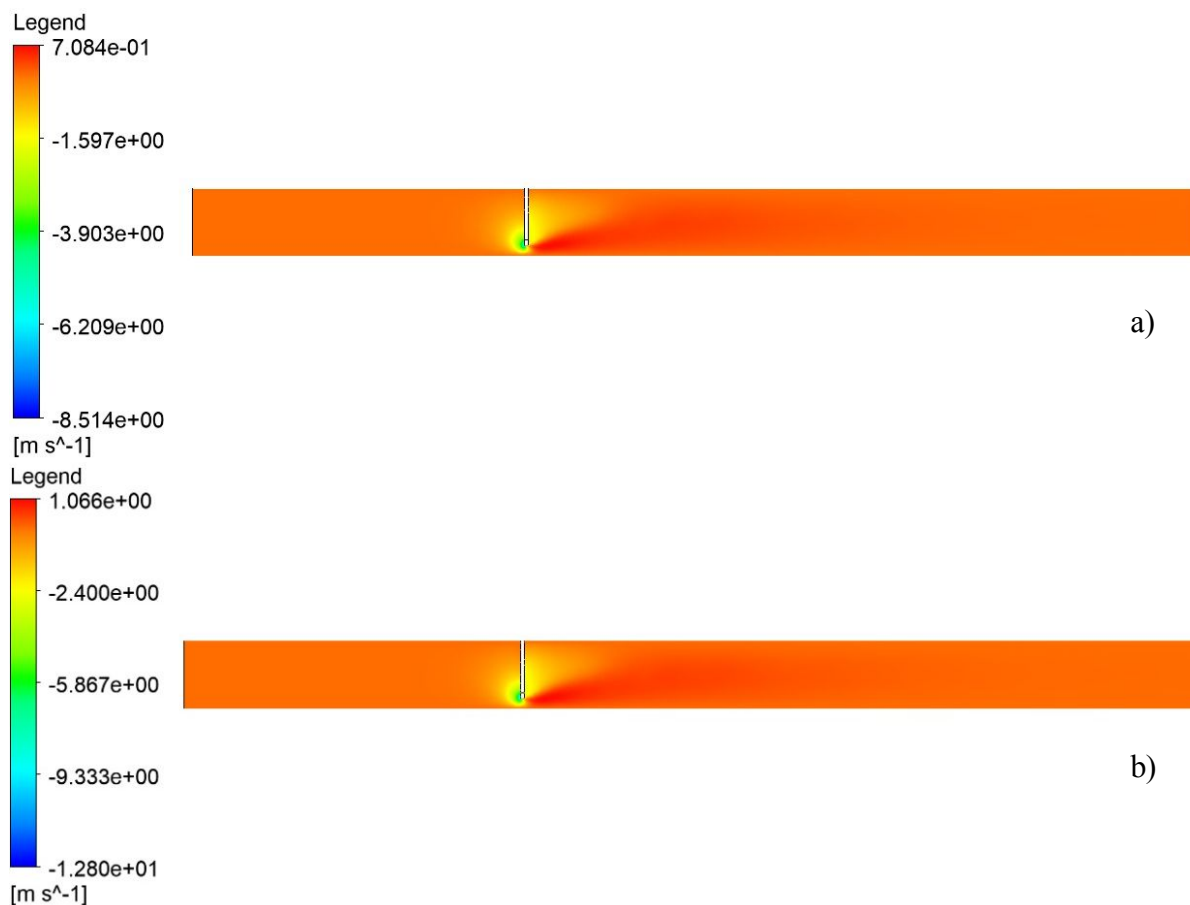
Slika 78. Raspodjela brzina u smjeru osi y (brzina v) na poprečnim profilima podmodela pločastog zatvarača s 80 % zatvorenosti i ulaznom brzinom toka od 1,5 m/s

a) Profil 1, b) Profil 2, c) Profil 3, d) Profil 4, e) Profil 5, f) Profil 6, g) Profil 7, h) Profil 8

Maksimalna vrijednost na prikazanim profilima javlja se na posljednjem korisnički definiranom poprečnom profilu i iznosi 12,87 m/s što nije maksimalna vrijednost unutar cijelog modela već samo maksimalna vrijednost koja se javlja na poprečnim profilima. Maksimalna vrijednost ne javlja se na korisnički definiranim poprečnim niti uzdužnim profilima. Maksimalna vrijednost brzine u smjeru osi y (brzina v) pojavila bi se u poprečnom profilu koji se nalazi iza posljednjeg. Na slici 79. su prikazani središnji uzdužni profili s prikazima promjena brzina toka u smjeru osi y (brzina v) uzduž vodoopskrbne cijevi za podmodele s 80 % zatvorenosti pločastog zatvarača. Na gornjem dijelu slike (a) prikazan je uzdužni profil kod podmodela s ulaznom brzinom toka od 1 m/s, dok je na donjem dijelu slike (b) prikazan profil kod podmodela s ulaznom brzinom toka od 1,5 m/s. Raspodjele brzina u smjeru osi y (brzina v) su podjednake, dok vrijednosti samih iznosa nisu jednake kao što je vidljivo iz legende na lijevom dijelu slike.

S grafičkog prikaza brzina u smjeru osi y (brzina v) na središnjim uzdužnim profilima je teško razaznati točan položaj maksimalnih vrijednosti brzina toka iz razloga što se te maksimalne vrijednosti javljaju na malom dijelu, dok su na ostalim dijelovima raspodjele većinom jednake kroz cijeli numerički model, pa je grafički teško uočiti na kojim se dijelovima točno pojavljuju ekstremi brzine v . Maksimalne vrijednosti koje se pojavljuju na središnjim profilima iznose 8,51 m/s za podmodel pločastog zatvarača s 80 % zatvorenosti i ulaznom brzinom toka od 1 m/s i 12,87 m/s za podmodel pločastog zatvarača s 80 %

zatvorenosti i ulaznom brzinom toka od 1,5 m/s. Maksimalne vrijednosti na središnjim uzdužnim profilima nisu ujedno i maksimalne vrijednosti unutar cijelog numeričkog modela.



Slika 79. Raspodjela brzina toka u smjeru osi y (brzina v) na središnjim uzdužnim profilima za podmodel pločastog zatvarača s 80 % zatvorenosti: a) model s ulaznom brzinom toka od 1 m/s, b) model s ulaznom brzinom toka od 1,5 m/s

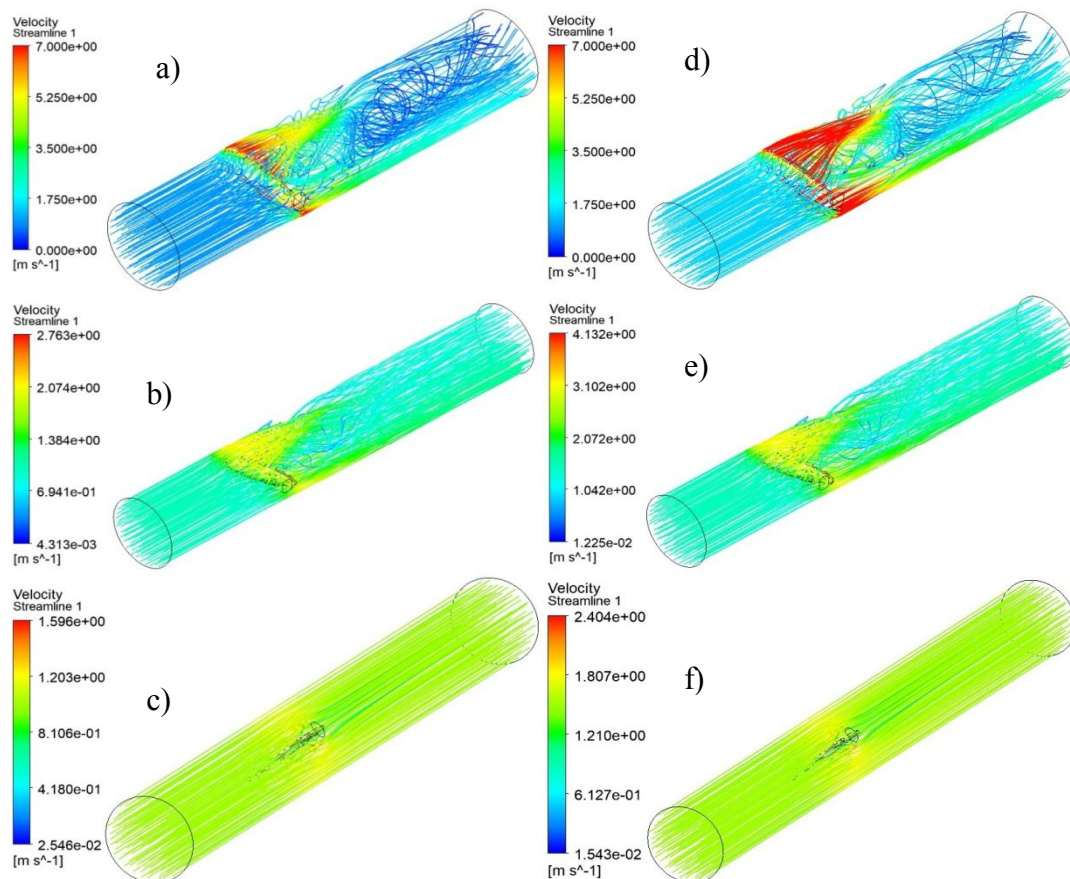
5.2. Rezultati ispitivanja leptirastih zatvarača

U ovom su poglavlju obrađeni rezultati hidrodinamičke analize opstrujavanja fluida oko pločastog zatvarača za sve podmodele spomenute u Poglavlju 4. U nastavku su međusobno uspoređene obrađene varijante u svakom podpoglavlju za pojedinu fizikalnu veličinu. Obrađivane fizikalne veličine su brzina toka (v), relativni tlak (p), totalni tlak (P), dinamička viskoznost (η), vrtložna viskoznost (μ), kinetička energija turbulencije (k), mjera deformacije smicanjem (γ), i brzine toka u smjerovima osi x (u), osi y (v) i osi z (w). Dana su objašnjenja dobivenih rezultata i usporedbe razlike rezultata među pojedinim modelima/podmodelima i varijantama. Prikazane su karakteristične vrijednosti fizikalnih veličina u značajnim korisnički definiranim profilima. Svaka od fizikalnih veličina mjerena je i prikazana na 10 poprečnih i 9 uzdužnih profila koji su za sve fizikalne veličine odabrani na jednakim pozicijama/ravninama. Poprečni profili pozicionirani su na način da je prvi pozicioniran na polovici raspona između početka cijevi i zatvarača, drugi i treći neposredno ispred zatvarača ili na samom zatvaraču (ovisno o stupnju otvorenosti leptirastog zatvarača), četvrti profil prolazi kroz središte zatvarača, sljedeća dva neposredno iza zatvarača ili na samom zatvaraču (ovisno o stupnju otvorenosti leptirastog zatvarača), sedmi na udaljenosti od približno 60 mm iza zatvarača, osmi na udaljenosti od približno 90 mm iza zatvarača, deveti na udaljenosti od približno 130 mm iza zatvarača i posljednji, deseti na udaljenosti od približno 210 mm iza zatvarača gledano u smjeru toka fluida. Uzdužni profili pozicionirani su na način da je središnji peti profil pozicioniran na sredini cijevi, a po četiri uzdužna profila postavljena su simetrično na jednakim udaljenostima na obje strane središnjeg profila. Kod analize leptirastih zatvarača, uzdužni profili pozicionirani su u smjeru paralelnom s smjerom zatvarača pri potpunoj otvorenosti. Prvi uzdužni profil nalazi se pri vrhu cijevi, a posljednji, deveti pri dnu cijevi.

5.2.1. Brzina toka fluida

Brzine unutar modela mogu se osim na profilima prikazati i strujnicama. Strujnice su krivulje koje povezuju točke s istim vrijednostima brzina toka. Na slici 80. prikazani su modeli s leptirastim zatvaračima, svaki od provedenih stupnjeva otvorenosti sa 150 strujnica. Prva 3 modela (lijevi stupac) prikazuju modele s ulaznom brzinom toka od 1 m/s, a sljedeća 3 modele s ulaznom brzinom toka od 1,5 m/s (desni stupac). Na temelju slike 80. uočljiva je pojava vrtložnih strujanja u području iza zatvarača kod modela leptirastih zatvarača s 30° i 60° otvorenosti što je posljedica naglog suženja/proširenja (ovisno otvara li se ili zatvara zatvarač) protočne površine na području zatvarača gdje također dolazi i do povećanja brzine.

Najveće brzine (prikazane crvenom bojom) javljaju se kod modela s manjim najmanjim stupnjem otvorenosti, tj. modela leptirastog zatvarača s 30° otvorenosti. Strujnice svakog od modela prikazane su lokalnim vrijednostima, što znači da boje nisu univerzalne i jednake na svakom od modela, pa se iz tog razloga brzine toka na modelu ne mogu međusobno uspoređivati ovisno o nijansama boja, već jedino pojedinačno. Razlog tome je što pri postavljanju jednakih granica za sve modele dolazi do manje razlike u nijansama boja za većinu modela, jer je minimalna i maksimalna vrijednost brzine toka svih modela veoma različita, pa se kod pojedinih modela nebi vidjela razlika brzina toka zbog male razlike u vrijednosti minimalne i maksimalne brzine toka fluida. Iz tog je razloga modele na slici 80. preporučljivo promatrati zasebno, a ne uspoređivati međusobno grafički. Unutar pojedinih modela definirane su granice brzina kako bi se razlika između vrijednosti brzina strujnica dočarala još jasnije, te kako bi pozicije maksimalnih vrijednosti bile lakše uočljive.



Slika 80. Prikaz modela leptirastih zatvarača sa strujnicama

- a) model s 30° otvorenosti i ulaznom brzinom toka od 1 m/s, b) model s 60° otvorenosti i ulaznom brzinom toka 1 m/s, c) model s 90° otvorenosti i ulaznom brzinom toka 1 m/s, d) model s 30° otvorenosti i ulaznom brzinom toka 1,5 m/s, e) model s 60° otvorenosti i ulaznom brzinom toka 1,5 m/s i f) model s 90° otvorenosti i ulaznom brzinom toka 1,5 m/s

Uporaba definiranih ograničenih vrijednosti brzine toka za prikaz na strujnicama vidljiva je na slikama 80.a) i d) gdje su korisnički definirane vrijednosti prikaza, minimalna od 0 m/s i maksimalna od 7 m/s kao što je vidljivo na pripadajućoj legendi. Za međusobnu usporedbu brzina toka koristiti će se tablični prikaz vrijednosti brzina toka za modele leptirastog zatvarača.

Maksimalne, minimalne i srednje vrijednosti brzina toka za svaki od modela/podmodela i obje ulazne brzine toka u m/s prikazane su u tablici 20. Vidljivo je kako je maksimalna brzina veća što je stupanj otvorenosti zatvarača manji, dakle kod manjih protočnih površina dolazi do pojave većih brzina toka fluida, u ovom slučaju vode kao što je definirano u postupku predprocesiranja. Proučavanje maksimalnih vrijednosti bitno je za dimenzioniranje zatvarača iz razloga što veće brzine toka mogu oštetiti konstrukciju zatvarača, pa je potrebno pravilno dimenzionirati zatvarač. Vrijednosti koje je bitno usporediti jesu srednje vrijednosti brzina toka zbog toga što srednja vrijednost daje realniji prikaz brzine toka unutar cijelokupnog modela.

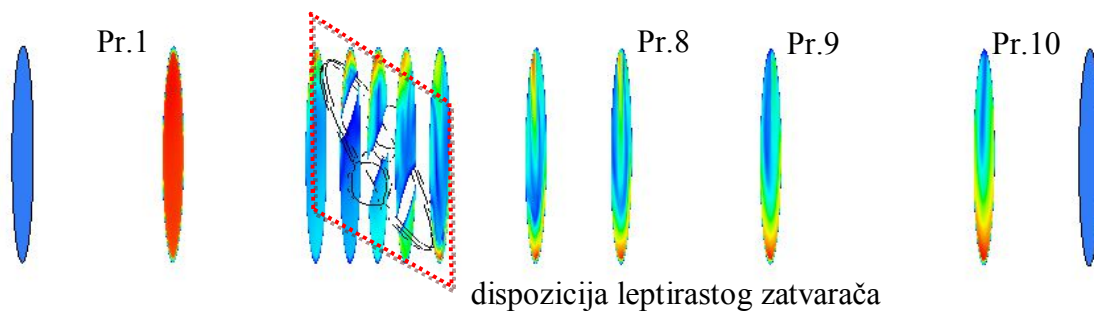
Tablica 20. Prikaz maksimalnih, minimalnih i srednjih vrijednosti brzine toka za svaki od modela leptirastog zatvarača

Stupanj otvorenosti zatvarača	v=1 m/s			v=1,5 m/s		
	Max	Min	Sr	Max	Min	Sr
30	9,414	0,026	2,192	14,097	0,018	3,383
60	2,764	0,004	1,156	4,132	0,012	1,729
90	1,596	0,025	1,018	2,404	0,015	1,527

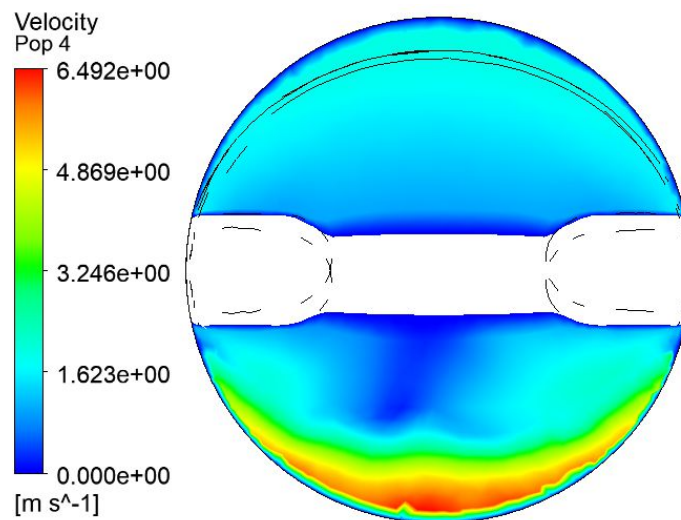
Iz prethodne tablice je vidljivo kako se prosječna i maksimalna brzina toka unutar modela eksponencijalno smanjuju ovisno o stupnju otvorenosti leptirastog zatvarača. Obavljen je izračun postotka smanjenja brzine toka za prosječne i maksimalne vrijednosti brzine na temelju tablice 20. Postotci smanjenja brzine poklapaju se na drugu decimalu i za srednje vrijednosti iznose redom, vrijednost srednje brzine kod modela s 60° otvorenosti iznosi približno 51%, odnosno 52% vrijednosti srednje brzine modela s 30° otvorenosti, dok vrijednost srednje brzine kod modela s 90° otvorenosti iznosi približno 88% vrijednosti srednje brzine modela s 60° otvorenosti. Postotci smanjenja maksimalnih vrijednosti iznose 341 % između modela s 30° i 60° otvorenosti i 172 % između modela 60° i 90° otvorenosti. Na temelju poklapanja brzina toka kod modela različitih ulaznih brzina može se ustanoviti eksponencijalna veza smanjenja maksimalnih i srednjih vrijednosti brzine toka za provedene pozicije otvorenosti leptirastog zatvarača. Za minimalne vrijednosti ovakav tip veze ne postoji, što je jasno vidljivo iz prethodne tablice. Vrijednosti maksimuma i minimuma Ansys

CFX kompjuterski program sam prikazuje u izborniku pri odabiru strujnica, dok su srednje vrijednosti izračunate putem tabličnog kalkulatora unutar samog Ansys CFX programa, pa je na taj način osigurano da ne dođe do „ljudske“ greške prilikom izračuna vrijednosti.

Raspored poprečnih profila prikazan je na slici 81., dok je na slici 82. prikazan poprečni profil brzine na položaju zatvarača s 30° otvorenosti s pripadajućom legendom za varijantu ulazne brzine toka od 1 m/s. Crvenom oznakom na slici 81. prikazana je dispozicija zatvarača.



Slika 81. Raspored poprečnih profila kod leptirastih modela u odnosu na dispoziciju zatvarača



Slika 82. Poprečni profil brzine toka na leptirastom zatvaraču s 30° otvorenosti

Zbog toga što središnji profil sječe konstruktivni dio leptirastog zatvarača koji spaja cijev i zatvarač vidljiva je kontura konstrukcije spomenutog dijela zatvarača. Također je vidljiva kontura ruba ploče leptirastog zatvarača koja se nalazi ispred promatranog profila, dok je donja kontura ruba ploče leptirastog zatvarača nevidljiva jer se nalazi iza zatvarača. U tablici 21. su prikazane maksimalne i srednje vrijednosti brzina toka za sve položaje zatvorenosti zatvarača s ulaznim brzinama 1 m/s i 1,5 m/s na poprečnim profilima.

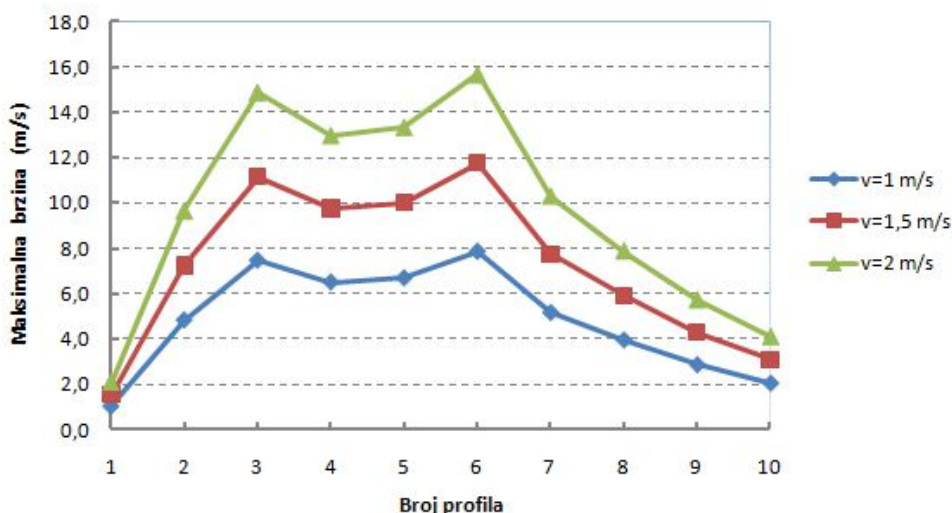
Podebljano unutar tablice su označene najveće vrijednosti maksimalnih i srednjih vrijednosti brzina toka za svaki postotak zatvorenosti zatvarača.

Tablica 21. Prikaz maksimalnih i srednjih vrijednosti brzina toka na leptirastom zatvaraču kod mjerodavnih poprečnih profila

Profil	v=1 m/s						v=1,5 m/s					
	30° otvorenosti		60° otvorenosti		90° otvorenosti		30° otvorenosti		60° otvorenosti		90° otvorenosti	
	Max	Sr	Max	Sr	Max	Sr	Max	Sr	Max	Sr	Max	Sr
1	1,033	0,993	1,048	0,990	1,018	0,988	1,549	1,491	1,571	1,487	1,524	1,484
2	4,825	1,209	1,979	1,055	1,029	0,982	7,235	1,816	2,966	1,584	1,539	1,475
3	7,449	1,654	2,169	1,150	1,048	0,989	11,167	2,483	3,257	1,725	1,567	1,486
4	6,492	2,153	2,132	1,277	1,187	1,032	9,750	3,224	3,205	1,917	1,777	1,549
5	6,674	2,163	2,089	1,145	1,510	1,246	10,015	3,220	3,140	1,719	2,266	1,870
6	7,840	2,404	2,043	1,260	1,240	0,966	11,776	3,616	3,068	1,892	1,857	1,451
7	5,151	2,312	1,933	1,240	1,145	0,980	7,755	3,430	2,905	1,863	1,716	1,472
8	3,943	1,745	1,786	1,156	1,105	0,970	5,914	2,654	2,686	1,737	1,654	1,457
9	2,857	1,406	1,676	1,102	1,078	0,974	4,292	2,052	2,522	1,657	1,614	1,463
10	2,044	1,170	1,417	1,054	1,050	0,977	3,091	1,754	2,134	1,584	1,572	1,468

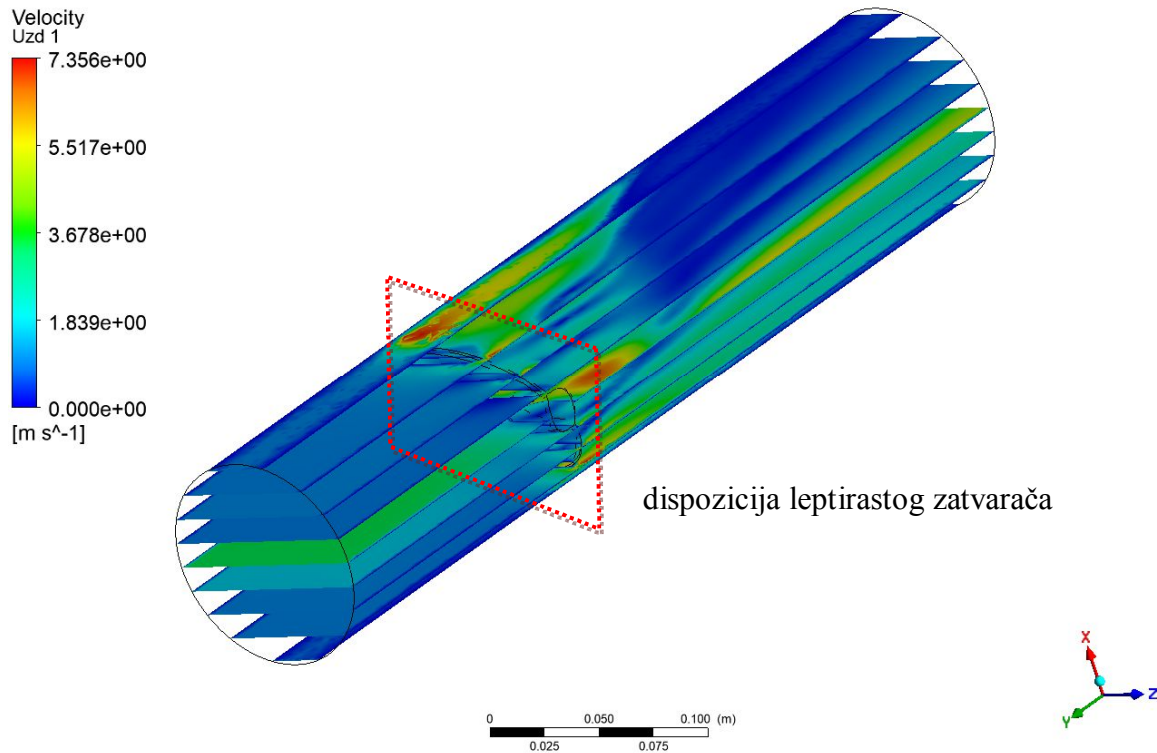
Pozicije najvećih maksimalnih i srednjih vrijednosti brzina toka fluida mijenjaju se ovisno o postotku zatvorenosti zatvarača kao što je vidljivo iz tablice 21. Također je uočljivo kako vrijednosti maksimalnih i srednjih brzina toka eksponencijalno padaju s povećanjem stupnja otvorenosti za sve profile u neposrednoj blizini zatvarača. Kod modela s 30° otvorenosti i ulaznom brzinom od 1 m/s srednja vrijednost brzine na sredini zatvarača iznosi 6,492 m/s, kod modela s 60° otvorenosti 2,132 m/s, a kod modela s 90° otvorenosti 1,187 m/s. Postotak povećanja odnosno smanjenja brzine toka ovisno o stupnju otvorenosti zatvarača nije moguće opisati matematički, jer raspored brzina nije jednak na svakom poprečnom profilu. Do pojave maksimalnih brzina toka dolazi pri manjim stupnjevima otvorenosti (na 6. profilu), neposredno iza zatvarača i iznose 7,840 m/s kod modela s ulaznom brzinom toka od 1 m/s i 11,776 m/s kod modela s ulaznom brzinom od 1,5 m/s. Maksimalne brzine toka kod modela s 30° i 90° otvorenosti zatvarača javljaju se nedaleko iza središta zatvarača, dok se kod modela s 60° otvorenosti zatvarača maksimalne vrijednosti brzine toka javljaju neposredno ispred zatvarača, odnosno na otvoru prednjeg (gornjeg) dijela zatvarača ispred središta zatvarača. Za najveće prosječne brzine toka unutar modela vrijedi gotovo jednaka tvrdnja kao za položaj pojavljivanja maksimalnih brzina toka. Iz toga se može zaključiti kako je za modeliranje zatvarača od obrađenih podmodela najbitniji model s 30° otvorenosti, gdje se javljaju maksimalne vrijednosti brzine toka. Osim toga, potrebno je predvidjeti moguće oštećenje cijevi neposredno ispred i iza zatvarača zbog pojava velikih brzina toka prilikom otvaranja i zatvaranja zatvarača. Odnos maksimalnih i srednjih brzina toka na poprečnim profilima veći je 1,5 puta kod modela s ulaznim brzinama toka 1,5 m/s uspoređujući s modelima ulazne

brzine toka od 1 m/s za poprečne presjeke. Preciznost odnosa smanjuje se udaljavanjem od područja zatvarača (npr. profil 10 gdje odnos iznosi 1,512). Na temelju veze tog međuodnosa moguće je pretpostaviti, odnosno izračunati maksimalne vrijednosti brzine za profil na zatvaraču za neku drugu ulaznu brzinu uzevši u obzir kako će točnost predviđene vrijednosti padati udaljavajući se od inicijalne ulazne brzine toka. Grafički prikaz pretpostavljenih vrijednosti brzine toka za pločasti model s 30° otvorenosti s ulaznom brzinom toka od 2 m/s u usporedbi s jednakim modelom s ulaznim brzinama od 1 m/s i 1,5 m/s prikazan je na slici 83. Plavom bojom je prikazana promjena maksimalnih brzina po poprečnim profilima za model s ulaznom brzinom toka od 1 m/s, crvenom bojom za model s ulaznom brzinom toka od 1,5 m/s i zelenom krivuljom pretpostavljene vrijednosti maksimalne vrijednosti brzine toka po profilima na temelju međuodnosa brzina toka za modelu s ulaznom brzinom od 2 m/s. Pretpostavljena maksimalna vrijednost brzine toka na 6. profilu za ulaznu brzinu od 2 m/s iznosi 15,68 m/s.



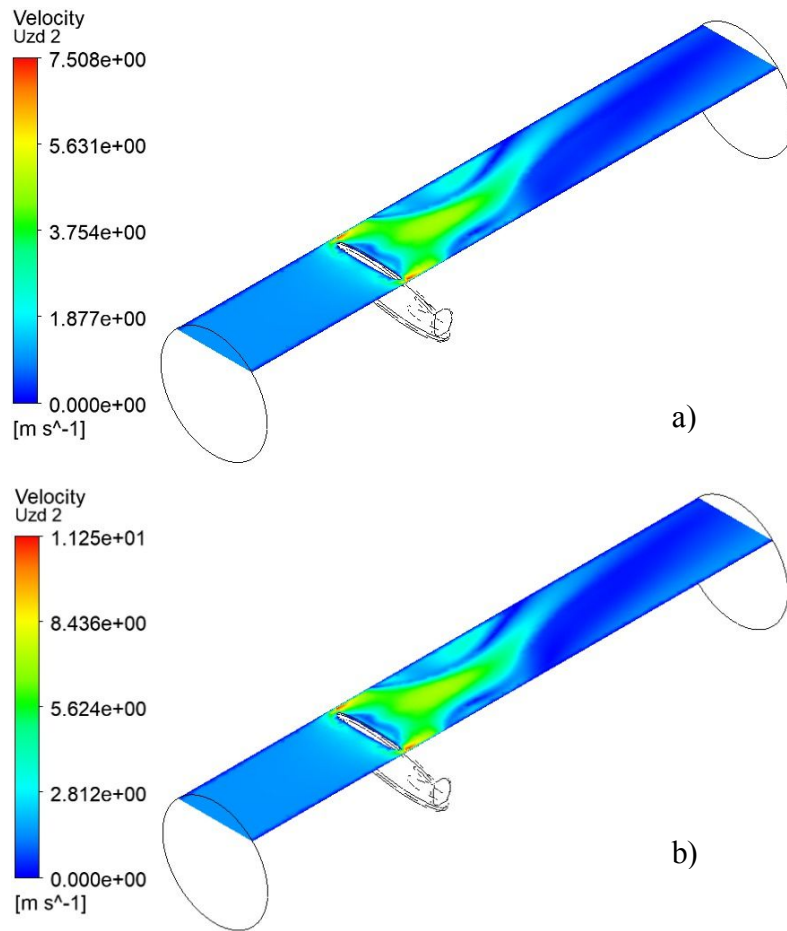
Slika 83. Grafički prikaz vrijednosti maksimalnih brzina toka za leptirasti model s 30° otvorenosti zatvarača na temelju poprečnih profila

Unutar rezultata pločastih modela definirano je 9 uzdužnih profila. Uzdužni profili kod leptirastih modela zatvarača postavljeni su na identičnim razmacima, počevši od ruba cijevi prema sredini, na način da središnji profil (profil 5) bude postavljen tako da sječe sredinu zatvarača. Prikaz položaja uzdužnih profila vidljiv je na slici 84. na primjeru leptirastog zatvarača s 30° otvorenosti.



Slika 84. Prikaz položaja uzdužnih profila kod modela leptirastog zatvarača

Uzdužni profili najpreglednije prikazuju promjenu brzine toka uzduž cijevi, te prijelaze brzine toka od ulazne brzine, zatim povećanje na području zatvarača i iza njega, te ponovni pad brzine toka na određenoj udaljenosti iza zatvarača, što je najbolje vidljivo kod većih brzina toka. Na sljedećoj slici 85. prikazani su drugi po redu uzdužni profili brzina toka za modele s 30° otvorenosti, iz razloga što su kod tih modela maksimalne i srednje brzine toka najveće. Drugi profil pozicioniran je na način da kod promatranog modela s 30° otvorenosti sjeku kraj zatvarača u gornjoj polovici cijevi. Središnji uzdužni profili kod leptirastog modela nisu mjerodavni za prikaz iz razloga što su maksimalne brzine toka koje se javljaju na srednjem profilu najmanje u usporedbi s ostalim uzdužnim profilima za promatrani model s 30° otvorenosti.



Slika 85. Drugi uzdužni profili brzina toka za 30° otvorenosti leptirastog zatvarača

a) model s ulaznom brzinom toka od 1 m/s, b) model s ulaznom brzinom toka od 1,5 m/s

Gornji dio slike 85.a) prikazuje model s ulaznom brzinom toka od 1 m/s, a donji dio slike 85.b) prikazuje model s ulaznom brzinom toka od 1,5 m/s. S pripadajućih legendi moguće je očitati brzine toka na uzdužnim profilima, te vidjeti kako se brzina toka mijenja uzduž modela. Uočljivo je kako je oblik profila brzina toka gotovo jednakog oblika za uzdužne profile oba numerička modela, iako je ulazna brzina toka različita. Na temelju grafičkog prikaza može se zaključiti da je raspodjela brzina toka približno ista i jednakog raspona iza zatvarača, pa se na temelju toga može pretpostaviti da će oblik raspodjele brzina toka za ostale ulazne brzine biti jednakog oblika, ali drukčijih vrijednosti kao što je prethodno spomenuto pri analizi brzina toka za poprečne profile. Maksimalna brzina toka na promatranom uzdužnom profilu javlja se u području zatvarača i kod gornjeg modela iznosi 7,50 m/s, dok kod donjeg iznosi 11,25 m/s, što daje omjer od točno 1,5, iz čega se kako je prethodno spomenuto može predvidjeti maksimalna brzina toka za neke druge ulazne brzine

toka za jednak oblik modela. Za ulaznu brzinu toka od 3 m/s maksimalna bi brzina toka na promatranom profilu na temelju međudnosa iznosila 22,50 m/s.

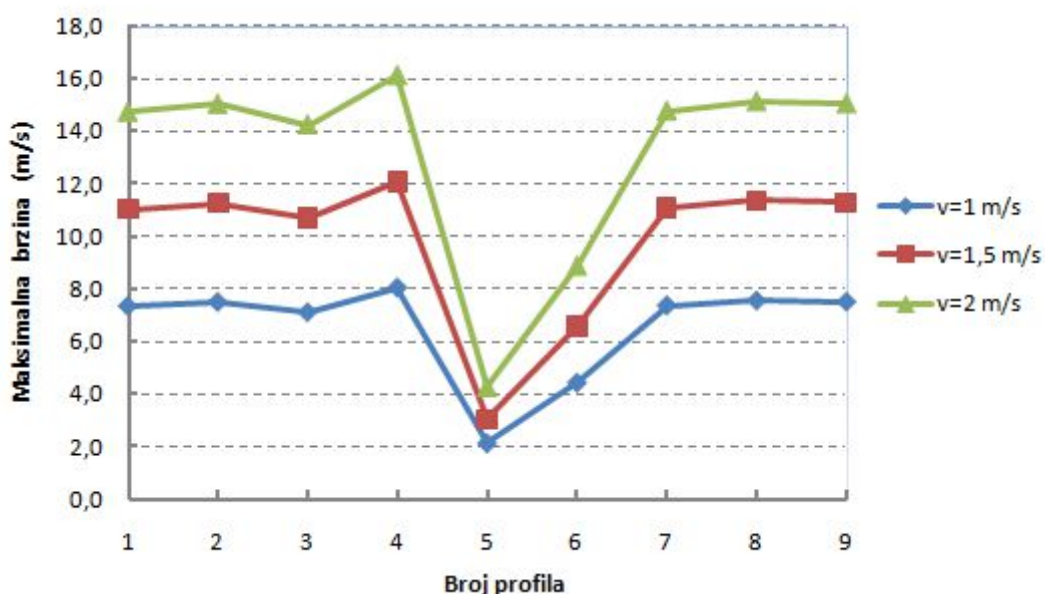
U tablici 22. su prikazane maksimalne i srednje vrijednosti brzina toka za sve obrađene stupnjeve zatvorenosti zatvarača s ulaznim brzinama 1 m/s i 1,5 m/s na uzdužnim profilima. Podebljano unutar tablice su označene najveće vrijednosti maksimalnih i srednjih vrijednosti brzina toka za svaki postotak zatvorenosti zatvarača. Sve vrijednosti brzina izražene su m/s.

Tablica 22. Prikaz maksimalnih i srednjih vrijednosti brzina toka na leptirastom zatvaraču kod mjerodavnih uzdužnih profila

Profil	v=1 m/s						v=1,5 m/s					
	30° otvorenosti		60° otvorenosti		90° otvorenosti		30° otvorenosti		60° otvorenosti		90° otvorenosti	
	Max	Sr	Max	Sr	Max	Sr	Max	Sr	Max	Sr	Max	Sr
1	7,356	2,091	2,073	1,029	1,205	0,815	11,027	3,175	3,111	1,550	1,811	1,228
2	7,508	1,670	2,104	1,039	1,456	0,937	11,247	2,492	3,157	1,562	2,187	1,409
3	7,119	1,239	2,168	1,011	1,478	0,981	10,710	1,841	3,257	1,518	2,218	1,475
4	8,053	1,044	2,232	1,111	1,447	1,023	12,077	1,557	3,342	1,667	2,170	1,535
5	2,138	0,976	2,198	1,208	1,280	1,041	3,054	1,445	3,294	1,814	1,917	1,562
6	4,440	1,226	2,190	1,126	1,355	1,028	6,589	1,836	3,283	1,690	2,030	1,544
7	7,377	1,636	2,159	1,023	1,515	0,988	11,068	2,443	3,244	1,536	2,274	1,485
8	7,561	2,143	2,075	1,044	1,478	0,934	11,358	3,210	3,116	1,569	2,222	1,406
9	7,518	2,629	1,953	1,046	1,326	0,821	11,289	3,942	2,933	1,575	2,000	1,237

Najveće maksimalne vrijednosti brzine toka na uzdužnim profilima kod zatvarača s 30° otvorenosti nalaze se kod četvrtog profila, odnosno prvog profila iznad središnjeg, dok se najveće srednje vrijednosti brzine toka javljaju kod najniže pozicioniranog uzdužnog profila. Razlog tome je geometrija zatvarača, tj. način odnosno smjer otvaranja zatvarača (donji dio leptirastog zatvarača otvara se u smjeru toka). Leptirasti zatvarači mogu biti konstruirani na taj ili suprotan način, da se gornji dio zatvarača otvara u smjeru toka pri čemu bi se maksimalne vrijednosti pojavljivale na nekom drugom uzdužnom profilu. Najveće srednje vrijednosti pojavljuju se upravo kod najnižeg uzdužnog profila zbog toga što je na tom profilu trajanje, tj. raspon velikih brzina najdulje, pri čemu dodatan doprinos ima i sila gravitacije. Kod zatvarača s 60° otvorenosti maksimalne vrijednosti se još uvijek nalaze na četvrtom profilu iz spomenutog razloga, dok se najveće srednje vrijednosti pojavljuju na središnjem profilu što je posljedica najduljeg raspona velikih brzina na tom profilu i tečenje koje se odvija uz tijelo zatvarača. Najveće maksimalne brzine toka na uzdužnim profilima kod zatvarača s potpunom otvorenosti od 90° pojavljuju se na profilu 7, tj drugom profilu ispod središnjeg uzdužnog profila, dok se maksimalna prosječna pojavljuje upravo na središnjem. Razlog pojave maksimalne vrijednosti brzine toka na profilu 7 nije u potpunosti jednostavno objasniti, no utjecaj tome imaju gravitacija (profil 3 na gornjoj strani cijevi imao bi jednaku

brzinu kada bi kompletni zatvarač bio zakrenut za 90°), smanjenje protočne površine na području zatvarača brzinu i tendencija vode da „izbjegava“ prepreke. Na temelju zadovoljenog međuodnosa numeričkog modela, jednako kao što je opisano i obrađeno za poprečne profile, moguće je izračunati vrijednosti brzina toka na uzdužnim profilima za ostale ulazne brzine. Grafičkim prikazom na slici 86. dani su prikazi vrijednosti maksimalnih brzina toka po uzdužnim profilima za model s 30° otvorenosti zatvarača, te pretpostavljene izračunate vrijednosti za jednaki model s ulaznom brzinom od 2 m/s za koji maksimalna brzina toka na uzdužnim profilima iznosi 16,106 m/s. Na profilima gdje se javljaju srednje brzine toka niže od ulaznih brzina moguća je pojava kavitacije.



Slika 86. Grafički prikaz vrijednosti maksimalnih brzina toka za leptirasti model s 30° otvorenosti zatvarača na temelju uzdužnih profila

5.2.2. Relativni tlak

Unutar CFD modeliranja na temelju $k-\varepsilon$ turbulentnog modela moguće je odabrati izračune relativnih i totalnih (ukupnih) tlakova za svaki od numeričkih modela/podmodela. Relativan tlak unutar Ansys Fluent kompjuterskog programa definiran je imenom „tlak“, te predstavlja vrijednost tlaka iznad definirane referentne vrijednosti. Totalni tlak opisan je u sljedećem potpoglavlju. Unutar ovog poglavlja prikazani su i opisani relativni tlakovi i njihove vrijednosti unutar modela leptirastih zatvarača. Sve spomenute vrijednosti u nastavku vezane uz tlakove biti će izražene u paskalima (Pa) kako bi se preciznije dočarala promjena relativnih tlakova unutar cijevi.

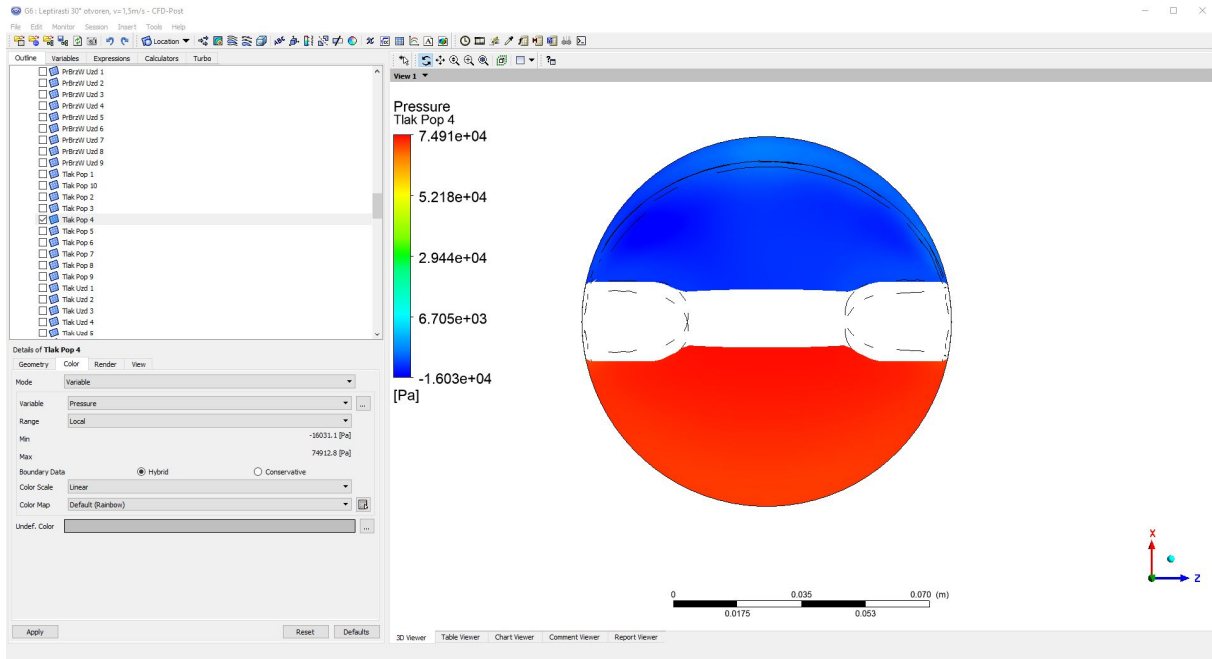
U nastavku je dana tablica 23. s vrijednostima maksimalnih, srednjih i minimalnih relativnih tlakova za sve podmodele leptirastih zatvarača.

Tablica 23. Prikaz maksimalnih, minimalnih i srednjih vrijednosti relativnih tlakova za svaki od modela leptirastog zatvarača

Stupanj otvorenosti zatvarača	v=1 m/s			v=1,5 m/s		
	Max [Pa]	Min [Pa]	Sr [Pa]	Max [Pa]	Min [Pa]	Sr [Pa]
30	33738	-43899	1094	75731	-98565	2519
60	1982	-4043	41	4414	-9035	90
90	680	-1016	9	1513	-2328	19

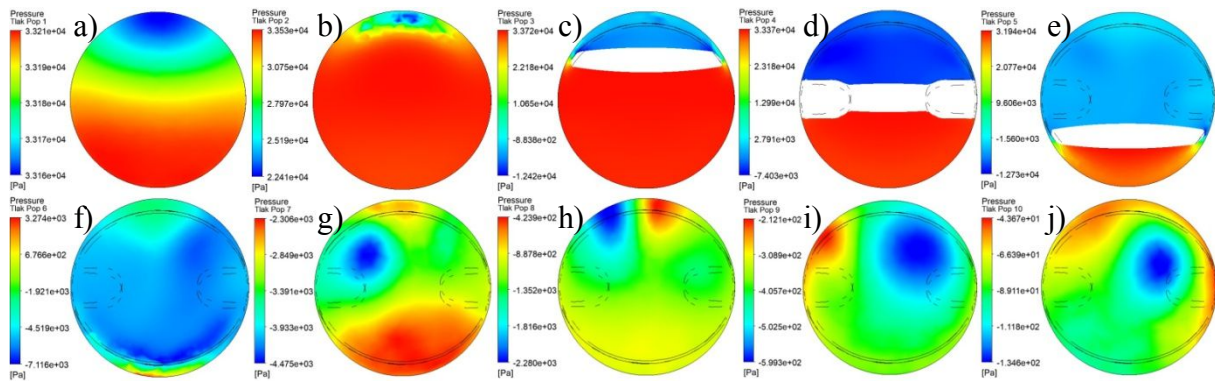
Najveće vrijednosti relativnih tlakova pojavljuju se kod najmanjeg stupnja otvorenosti zatvarača. Vrijednosti maksimalnih, minimalnih i srednjih relativnih tlakova eksponencijalno padaju s otvorenošću zatvarača do potpune otvorenosti. Prosječan relativni tlak kod zatvarača s 30° otvorenosti je približno 50 puta veći nego kod zatvarača s potpunom otvorenosti. Pretpostavljanje relativnih tlakova za jednake modele s različitim ulaznim brzinama toka fluida na temelju međuodnosa tlakova nije preporučljivo iz razloga što ne postoji jednostavna veza na temelju koje bi se to moglo sprovesti. Dakle, za dobivanje relativnih tlakova pri drukčijoj ulaznoj brzini toka potrebno je promijeniti parametar ulazne brzine, te ponovo procesirati model kako bi se dobili pouzdani rezultati. Na temelju tablice za pretpostaviti je kako će se pri manjim stupnjevima otvorenosti zatvarača javiti još veći relativni tlakovi do određenog stupnja zatvorenosti kada će se tlakovi smanjivati. Negativna vrijednost minimalnih vrijednosti označava pojavu podtlaka, odnosno pojavu tlaka koji je niži od atmosferskog tlaka, odnosno u našem slučaju referentnog tlaka. U nastavku je prikazano u kojem dijelu cijevi dolazi do pojave podtlaka. Vrijednosti koje je potrebno analizirati prilikom dimenzioniranja zatvarača u ovisnosti o tlaku su maksimalni i minimalni tlakovi. Pretpostavka je kako će se maksimalne vrijednosti pojaviti pri početnom, odnosno završnom stupnju otvorenosti zatvarača, npr. 1 % otvorenosti. Pitanje tlakova je veoma bitno zbog toga što pri pojavi ekstremnih maksimalnih i minimalnih tlakova može doći do širenja, odnosno stezanja same cijevi, što može dovesti do njenog oštećenja i pucanja. Slikom 87. je prikazano grafičko sučelje postprocesiranja rezultata za podmodel pločastog zatvarača s 30° otvorenosti i ulaznom brzinom toka od 1,5 m/s. Na lijevoj strani slike vidljive su maksimalne i minimalne vrijednosti relativnog tlaka za odabrani poprečni profil 4 koji prolazi kroz središte leptirastog zatvarača. Na desnom dijelu slike vidljiv je grafički prikaz raspodjele relativnih tlakova na odabranom profilu uz pripadajuću legendu. Tamno plavom bojom označena su područja minimalnih relativnih tlakova, odnosno podtlaka, čije je točne položaje teško precizno

definirati jer je razlika maksimalne i minimalne vrijednosti velika, pa su samim time i razlike nijansa kod prikazanog profila teško uočljive. Maksimalne vrijednosti relativnog tlaka na promatranom poprečnom profilu od 74193 Pa prikazane su tamno crvenom bojom i pojavljuju se prije samog suženja na donjem dijelu cijevi. Podtlak se javlja u području iza zatvarača (gornja polovica cijevi) i iznosi 16031 Pa na promatranom profilu. Na gornjoj polovici cijevi su vidljive konture zatvarača, dok konture donjeg dijela zatvarača nisu vidljive jer se nalaze iza promatranog profila.



Slika 87. Sučelje postprocesiranja s profilom relativnih tlakova na leptirastom zatvaraču za podmodel s 30° otvorenosti zatvarača i ulaznom brzinom od 1,5 m/s

Na slici 88. prikazani su u gornjem redu prvih 5 poprečnih profila relativnih tlakova (a), b), c), d) i e)) i u donjem redu posljednjih 5 poprečnih profila relativnih tlakova (f), g), h), i) i j)) za podmodel pločastog zatvarača pri 30° otvorenosti s ulaznom brzinom toka od 1 m/s. Uz svaki profil dodana je pripadajuća legenda na temelju koje je moguće približno očitati vrijednost relativnog tlaka u bilo kojoj točki tog profila. Pomoću slike vidljivo je kretanje vrijednosti relativnih tlakova duž cijevi na zadanim profilima.



Slika 88. Raspodjela relativnih tlakova na poprečnim profilima podmodela leptirastog zatvarača s 30° otvorenosti i ulaznom brzinom od 1 m/s; a) Profil 1, b) Profil 2, c) Profil 3, d) Profil 4, e) Profil 5, f) Profil 6, g) Profil 7, h) Profil 8, i) Profil 9, j) Profil 10

Tablicom 24. su prikazane maksimalne, minimalne i srednje vrijednosti relativnih tlakova na poprečnim profilima za sve podmodele i obje ulazne brzine. Sve vrijednosti prikazane su u paskalima (Pa) kako bi se dobio što precizniji dojam o promjeni veličina tlakova na profilima. Na temelju tablice moguće je uočiti kod kojeg se profila javljaju maksimalni relativni tlakovi, i minimalni relativni tlakovi, tj. najveći podtlakovi. Ekstremne vrijednosti označene su podebljanim brojkama za svaki postotak otvorenosti pločastog zatvarača.

Tablica 24. Prikaz vrijednosti maksimalnih, minimalnih i srednjih relativnih tlakova na poprečnim profilima kod modela leptirastog zatvarača

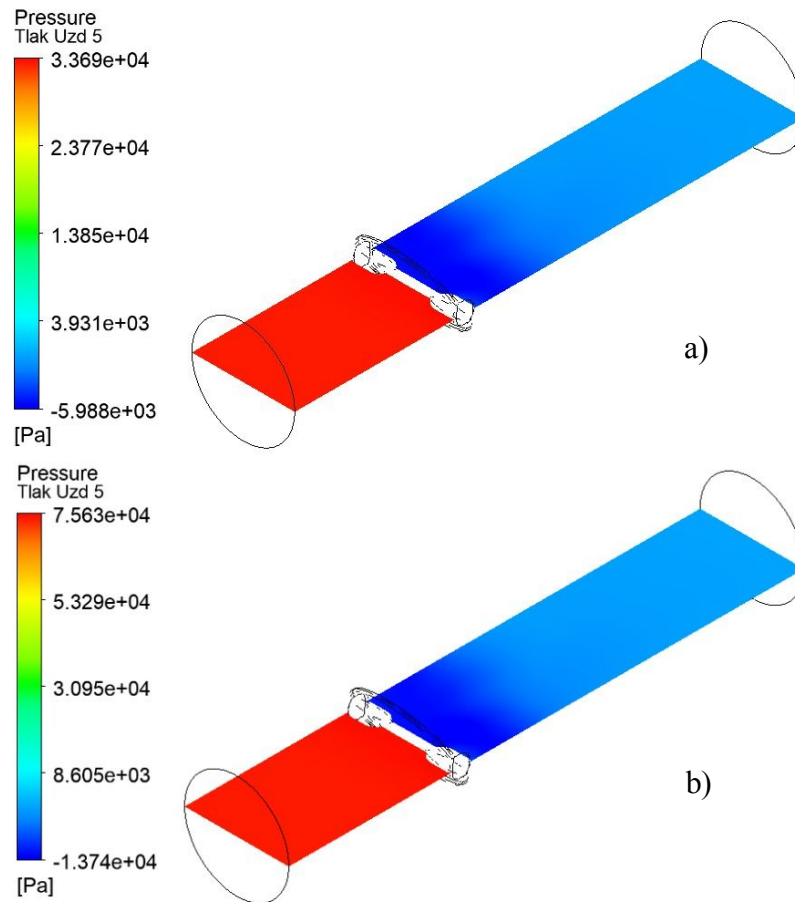
Profil	v=1 m/s								
	30° otvorenosti			60° otvorenosti			90° otvorenosti		
	Max	Min	Sr	Max	Min	Sr	Max	Min	Sr
1	33207	33157	33190	1444	1364	1413	223	221	222
2	33533	22412	32720	1777	-121	1298	204	201	203
3	33719	-12418	26965	1857	-1864	728	313	140	187
4	33374	-7403	13615	1364	-1112	120	428	46	137
5	31939	-12726	348	980	-1427	-419	5	-961	-151
6	3274	-7116	-5044	342	-1109	-561	4	-129	-36
7	-2306	-4475	-3030	-40	-500	-245	129	-255	35
8	-424	-2280	-1175	2	-225	-72	80	48	63
9	-212	-599	-400	31	-135	-27	64	58	61
10	-44	-135	-79	41	-19	17	41	39	40

Profil	v=1,5 m/s								
	30° otvorenosti			60° otvorenosti			90° otvorenosti		
	Max	Min	Sr	Max	Min	Sr	Max	Min	Sr
1	74538	74428	74500	3209	3030	3140	467	464	466
2	75272	50288	73465	3957	-307	2882	431	423	427
3	75688	-27798	60525	4140	-4227	1603	676	289	395
4	74913	-16031	30585	3031	-2528	2390	937	80	283
5	71686	-29092	675	2181	-3245	-972	-11	-2202	-364
6	7262	-16304	-11500	740	-2515	-1288	-11	-312	-100
7	-4951	-9794	-6929	-116	-1147	-574	272	-596	59
8	-755	-5578	-2599	-16	-526	-183	162	89	124
9	-374	-1240	-813	540	-320	-77	128	115	122
10	-90	-295	-169	83	-55	27	83	77	80

Pojave najvećih relativnih tlakova, najvećih podtlakova i najvećih prosječnih relativnih tlakova pojavljuju se kod obje varijante ulaznih brzina toka na jednakim profilima. Maksimalne vrijednosti relativnog tlaka poprečnih profila iznose 33,719 kPa za varijantu ulazne brzine 1 m/s, i 75,688 kPa (~0,76 bara) za varijantu ulazne brzine 1,5 m/s i pojavljuju se kod podmodela s 30° otvorenosti na trećem profilu koji je postavljen 5,5 cm ispred središnje osi leptirastog zatvarača, gledano u smjeru toka fluida. Najveći podtlakovi javljaju se također kod podmodela s 30° otvorenosti na petom profilu koji se nalazi na sredini zatvarača. Najveći podtlakovi iznose 12,726 kPa za varijantu s ulaznom brzinom 1 m/s i 29,092 kPa za varijantu s ulaznom brzinom 1,5 m/s. Na dijelu cijevi iza pločastog zatvarača moguća je pojava kavitacije upravo zbog pojava negativnih tlakova. Kavitacija predstavlja nastanak mjehurića ispunjenih parama unutar kapljevine koja struji pri prisutstvu udarnih tlakova. Bitno je uočiti kako u profilu 7 za gotovo sve obrađene stupnjeve otvorenosti predvladava podtlak na cijeloj površini poprečnog profila, izuzevši podmodel s potpunom otvorenosti zatvarača. Također je potrebno napomenuti kako je relativan tlak najstabilniji (razlike maksimuma i minimuma su najmanje) na prvom poprečnom profilu svih modela. Ta mala promjena u razlici minimalnog i maksimalnog tlaka na prvom poprečnom profilu ukazuje kako i ondje postoji utjecaj položaja zatvarača u cijevi, iako je taj utjecaj u spomenutom profilu neusporedivo manji s relativnim tlakovima u blizini zatvarača. Najveći srednji relativni tlakovi i najveći vakuum puno su veći kod podmodela s manjim stupnjem otvorenosti (30° otvorenosti) u odnosu na najveće pri podmodelima s 60° i 90° otvorenosti. Primjerice vrijednost najvećeg srednjeg relativnog tlaka kod 30° otvorenosti gotovo je 160 puta veća nego najveća vrijednost relativnog tlaka kod podmodela s 90° otvorenosti. Na osnovu tablice pri povećanju ulazne brzine toka i smanjenju stupnja otvorenosti pločastog zatvarača može se očekivati dodatno povećanje relativnih tlakova do određenog stupnja otvorenosti kada vrijednost maksimalnog tlaka pada u odnosu na vrijednost tlaka kod sljedećeg većeg postotka otvorenosti zatvarača. Za obrađene podmodele, maksimalan apsolutni tlak koji se može očekivati unutar cijevi iznosi 1,76 bara za podmodel s 30° otvorenosti i ulaznom brzinom toka od 1,5 m/s što je u potpunosti prihvatljiv tlak za vodoopskrbne cijevi.

Na slici 89. su prikazani središnji uzdužni profili s prikazima promjena relativnih tlakova uzduž cijevi za podmodele s 30° otvorenosti leptirastog zatvarača. Na gornjem dijelu slike (a)) prikazan je uzdužni profil kod podmodela s ulaznom brzinom toka od 1 m/s, dok je

na donjem dijelu slike (b)) prikazan profil kod podmodela s ulaznom brzinom toka od 1,5 m/s. Raspodjele totalnih tlakova su identične, dok vrijednosti samih tlakova nisu jednake.



Slika 89. Raspodjela relativnih tlakova na središnjim uzdužnim profilima za podmodel s 30° otvorenosti: a) model s ulaznom brzinom 1 m/s, b) model s ulaznom brzinom 1,5 m/s

Maksimalne vrijednosti relativnih tlakova za obje varijante javljaju se na, odnosno u neposrednoj blizi središnjeg profila i kod središnjeg profila iznose 33,691 kPa za varijantu s ulaznom brzinom toka 1 m/s i 75,627 kPa za varijantu s ulaznom brzinom toka od 1,5 m/s za podmodel s otvorenošću zatvarača pod 30° . Minimalne vrijednosti relativnog tlaka prethodno spomenute u tablici 23. ne nalaze se na srednjem uzdužnom profilu. Položaj definiranih uzdužnih profila prikazan je na slici 84.

5.2.3. Totalni tlak

Totalni tlak (*eng. total pressure*) unutar Ansysovog programskog paketa, a i u praksi predstavlja sumu relativnog i dinamičkog tlaka. Totalni tlak naziva se i stagnacijski tlak. Razlika između relativnog i totalnog tlaka je dinamički tlak koji predstavlja kinetičku energiju putujućeg fluida [42].

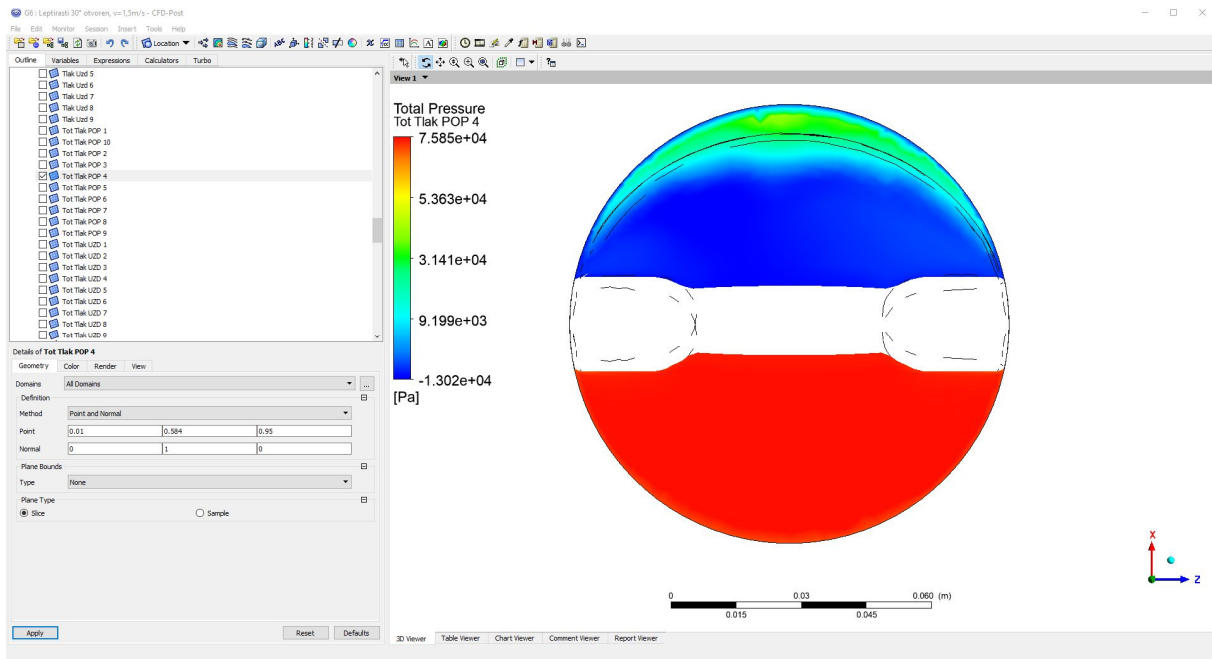
Totalni tlak je izračunat na svim poprečnim i uzdužnim profilima zadanim unutar numeričkog modela, a njegove maksimalne i minimalne vrijednosti unutar cijelog modela izračunate su uz pomoć strujnica (*eng. streamline*) za koje je moguće odabrati bilo koju fizikalnu veličinu za koju želimo dobiti minimalne i maksimalne vrijednosti. Korištenjem tabličnog proračuna unutar ANSYS programskog paketa dobivene su srednje vrijednosti totalnih tlakova za svaki podmodel. Tablicom 25. dane su maksimalne, minimalne i srednje vrijednosti totalnih tlakova unutar svih podmodela za obje varijante ulaznih brzina toka. Sve su vrijednosti prikazane u paskalima (Pa) kako bi se što vjernije dočarala razlika totalnih tlakova unutar modela.

Tablica 25. Prikaz maksimalnih, minimalnih i srednjih vrijednosti totalnih tlakova za svaki od modela leptirastih zatvarača

Stupanj otvorenosti zatvarača	v=1 m/s			v=1,5 m/s		
	Max [Pa]	Min [Pa]	Sr [Pa]	Max [Pa]	Min [Pa]	Sr [Pa]
30	41198	-19015	14820	92658	-43421	34285
60	2637	-2493	1173	5910	-5689	2624
90	1050	-617	617	2321	-1408	1367

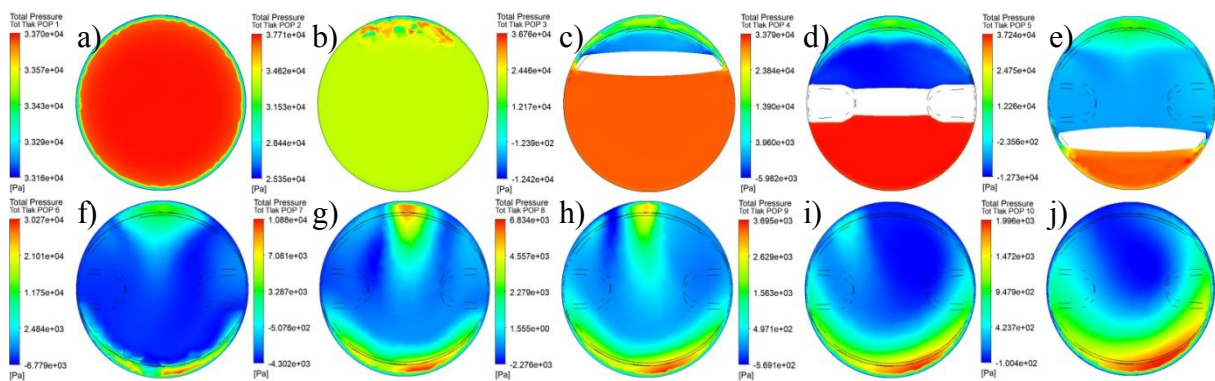
Najveće vrijednosti totalnih tlakova pojavljuju se kod najmanjeg stupnja otvorenosti zatvarača. Vrijednosti maksimalnih, minimalnih i srednjih totalnih tlakova eksponencijalno padaju s otvorenošću zatvarača. Prosječan totalni tlak kod zatvarača s 30° otvorenosti približno je 24 puta veći nego kod zatvarača s 90° otvorenosti. Pretpostavljanje totalnih tlakova za jednake numeričke modele s različitim ulaznim brzinama toka na temelju međuodnosa tlakova nije preporučljivo iz razloga što ne postoji jednostavna veza na temelju koje bi se to moglo sprovesti. Dakle, za dobivanje totalnih tlakova pri drukčijoj ulaznoj brzini toka potrebno je promijeniti parametar ulazne brzine, te ponovo procesirati model kako bi se dobili pouzdani rezultati. Na temelju tablice 25. za pretpostaviti je kako će se pri većim manjim stupnjevima otvorenost zatvarača javiti još veći totalni tlakovi do određenog stupnja otvorenosti, kada će se vrijednosti smanjivati. Također, može se pretpostaviti kako će za jednaku geometriju uz povećanje ulazne brzine totalni tlakovi rasti zbog povećanja brzine unutar cijevi. Negativna vrijednost totalnog tlaka označava pojave vrijednosti totalnih tlakova koje su niže od vrijednosti referentnog tlaka zadanog u početku, odnosno pojavu totalnog tlaka koji je niži od atmosferskog tlaka. U nastavku je na temelju vrijednosti tlakova na poprečnim profilima prikazano u kojem dijelu cijevi dolazi do javljanja maksimalnih i minimalnih vrijednosti totalnih tlakova. Vrijednosti koje je potrebno analizirati prilikom dimenzioniranja zatvarača u ovisnosti o tlaku su maksimalni i minimalni tlakovi na i u blizini zatvarača. Pretpostavka je kako će se maksimalne vrijednosti pojaviti pri najmanjem stupnju

otvorenosti zatvarača, npr. 1° otvorenosti. Pitanje tlakova je veoma bitno zbog toga što pri pojavi ekstremnih maksimalnih i minimalnih tlakova može doći do širenja, odnosno stezanja same cijevi, što može dovesti do njenog oštećenja i pucanja. Uspoređujući tablicu 25. i tablicu 23. vidljivo je kako su totalni tlakovi veći od relativnih. Razlika između tih vrijednosti predstavlja dinamički tlak koji u našem slučaju ovisi o brzini toka vode koja nije jednaka za svaki postotak otvorenosti leptirastog zatvarača, pa iz tog razloga vrijednosti razlika relativnih i totalnih tlakova variraju i nisu jednake za svaki postotak otvorenosti zatvarača. Slikom 90. je prikazano grafičko sučelje postprocesiranja rezultata s korisnički definiranim poprečnim profilom totalnih tlakova kod podmodela leptirastog zatvarača s 30° otvorenosti i ulaznom brzinom fluida od 1,5 m/s. Na lijevoj strani slike vidljive su maksimalne i minimalne vrijednosti totalnog tlaka za odabrani poprečni profil 4 koji prolazi kroz zatvarač. Na desnom dijelu slike vidljiv je grafički prikaz raspodjele totalnih tlakova na odabranom profilu uz pripadajuću legendu. Tamno plavom bojom označena su područja minimalnih totalnih tlakova, dok su maksimalne vrijednosti totalnog tlaka prikazane crvenom bojom. Negativan totalni tlak se na promatranom profilu javlja u gornjoj polovici cijevi, iza zatvarača tijela pločastog zatvarača, dok se najveći totalni tlak javlja u donjoj polovici protočne površine ispred zatvarača i iznosi 75,847 kPa. Niže vrijednosti totalnih tlakova prikazane su hladnijim bojama (nijanse plave), prosječne nijansama zelene, dok su veće vrijednosti prikazane toplijim bojama (žuta i crvena).



Slika 90. Sučelje postprocesiranja s profilom totalnih tlakova na leptirastom zatvaraču za podmodel s 30° otvorenosti i ulaznom brzinom od 1,5 m/s

Na slici 91. prikazani su redom u gornjem redu prvih 5 poprečnih profila totalnih tlakova (a), b), c), d) i e)) i u donjem redu posljednjih 5 poprečnih profila totalnih tlakova (f), g), h), i) i j)) za podmodel leptirastog zatvarača pri 30° otvorenosti s ulaznom brzinom toka od 1 m/s. Uz svaki profil dodana je pripadajuća legenda na temelju koje je moguće približno očitati vrijednost totalnog tlaka u bilo kojoj točki tog profila. Pomoću slike vidljivo je kretanje vrijednosti totalnih tlakova duž cijevi na zadanim profilima. Prikazi relativnih i totalnih tlakova na poprečnim profilima nisu jednaki zbog toga što vrijednosti totalnih tlakova ovise o brzinama toka, pa su iz tog razloga u području prije zatvarača totalni tlakovi jednoliki po cijeloj površini poprečnog profila zbog jednolike brzine toka fluida na tom području, izuzevši dio uz stijenku cijevi. To naime nije slučaj u ostalim profilima iza zatvarača, jer su ondje brzine toka većih vrijednosti na različitim dijelovima svakog profila.



Slika 91. Raspodjela totalnih tlakova na poprečnim profilima podmodela leptirastog zatvarača s 30° otvorenosti i ulaznom brzinom toka od 1 m/s

a) Profil 1, b) Profil 2, c) Profil 3, d) Profil 4, e) Profil 5, f) Profil 6, g) Profil 7, h) Profil 8, i) Profil 9, j) Profil 10

Tablicom 26. su prikazane maksimalne, minimalne i srednje vrijednosti totalnih tlakova na poprečnim profilima za sve podmodele leptirastog zatvarača i obje ulazne brzine toka. Sve vrijednosti prikazane su u paskalima (Pa) kako bi se dobio što precizniji dojam o promjeni veličina tlakova na profilima. Na temelju tablice moguće je uočiti kod kojeg se profila javljaju maksimalni i minimalni totalni tlakovi. Ekstremne vrijednosti totalnih tlakova označene su podebljanim brojkama za svaki postotak otvorenosti pločastog zatvarača kako bi se jednostavnije uočile ekstremne vrijednosti.

Pojave najvećih i najmanjih totalnih tlakova i najvećih prosječnih totalnih tlakova pojavljuju se kod obje varijante ulaznih brzina na jednakim profilima. Na temelju tog dozvoljeno je pretpostaviti kako će se ekstremne vrijednosti totalnih (ukupnih) tlakova za poprečne profile uvijek javiti na jednakim profilima. Maksimalne vrijednosti totalnog tlaka

iznose 37,710 kPa za varijantu ulazne brzine 1 m/s, i 84,679 kPa za varijantu ulazne brzine 1,5 m/s i pojavljuju se kod podmodela s 30° otvorenosti na drugom profilu koji je postavljen 11 cm ispred središnje osi leptirastog zatvarača gledano u smjeru toka fluida.

Tablica 26. Prikaz vrijednosti maksimalnih, minimalnih i srednjih totalnih tlakova na poprečnim profilima kod modela leptirastog zatvarača

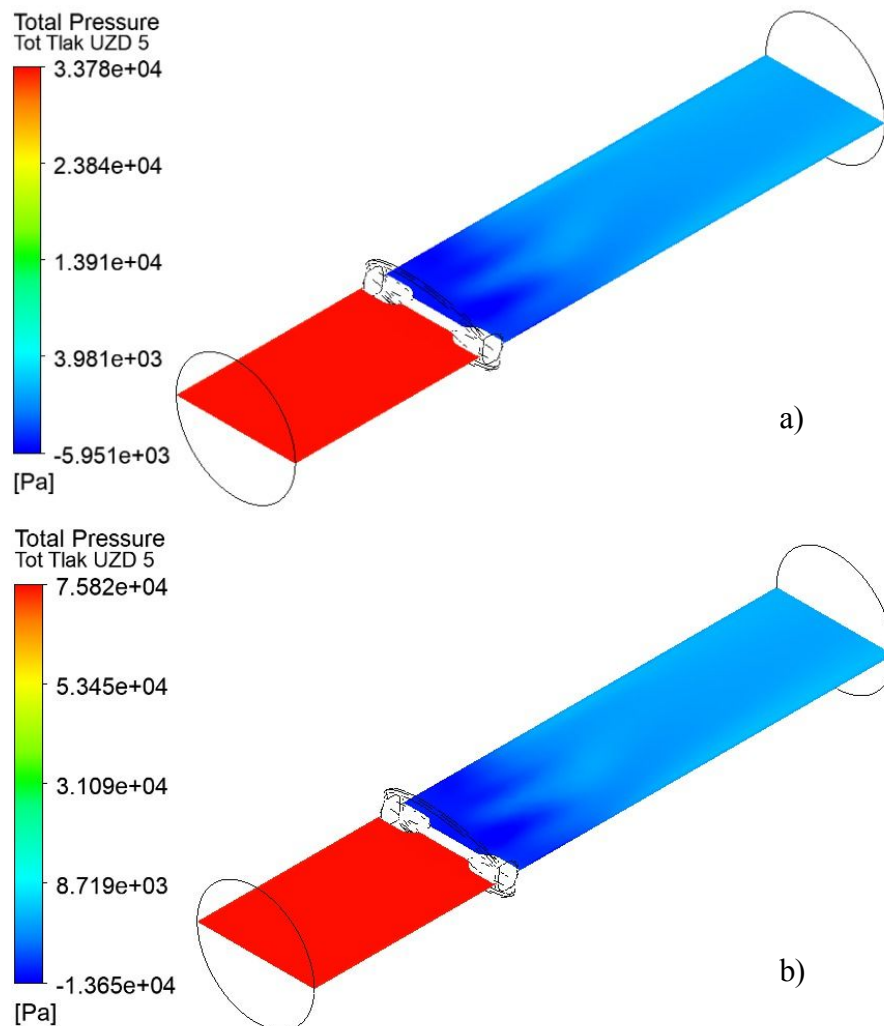
Profil	v=1 m/s								
	30° otvorenosti			60° otvorenosti			90° otvorenosti		
	Max	Min	Sr	Max	Min	Sr	Max	Min	Sr
1	33702	33158	33685	1930	1364	1902	739	221	709
2	37710	25345	33820	2269	53	1913	731	201	683
3	36758	-12418	30190	2291	-1864	1547	758	157	675
4	33786	-5982	16955	1963	-1112	1048	763	46	670
5	37237	-12726	3956	2609	-1427	451	744	-961	627
6	30271	-6779	-196	2060	-1109	429	715	-129	479
7	10875	-4302	572	1790	-484	675	686	-255	532
8	6834	-2276	943	1558	-185	683	672	48	540
9	3695	-569	874	1400	-51	642	640	58	537
10	1996	-100	753	1027	12	595	590	39	517

Profil	v=1,5 m/s								
	30° otvorenosti			60° otvorenosti			90° otvorenosti		
	Max	Min	Sr	Max	Min	Sr	Max	Min	Sr
1	75651	74429	75610	4299	3030	4243	1624	464	1564
2	84679	56877	75935	5065	84	4270	1609	423	1513
3	82572	-27798	67795	5119	-4227	3448	1669	326	1497
4	75848	-13018	38105	4375	-2528	2330	1684	80	1486
5	83609	-29092	8755	5846	-3245	989	1646	-2202	1390
6	68025	-15423	-545	4602	-2515	945	1577	-312	1058
7	24539	-9487	1128	4010	-1113	1502	1513	-596	1182
8	15471	-5578	2222	3504	-441	1524	1486	89	1200
9	8434	-1212	1968	3153	-133	1434	1419	115	1196
10	4584	-218	1702	2321	16	1334	1312	77	1157

Najniži totalni tlakovi javljaju se također kod podmodela s 30° otvorenosti na središnjem (petom) profilu. Najniže vrijednosti totalnih tlakova iznose -12,726 kPa za varijantu s ulaznom brzinom 1 m/s i -29,092 kPa za varijantu s ulaznom brzinom toka od 1,5 m/s. Najveći srednji totalni tlakovi i najniži totalni tlakovi puno su veći kod podmodela s manjim stupnjem otvorenosti u odnosu na podmodele s većim stupnjem otvorenosti zatvarača, primjerice vrijednost najvećeg srednjeg totalnog tlaka 30° otvorenosti gotovo je 49 puta veća nego najveća vrijednost srednjeg totalnog tlaka kod podmodela s potpunom otvorenosti. Usporedbe radi, odnos maksimalnih relativnih tlakova za iste slučajeve iznosio je čak 160. Na osnovu tablice pri povećanju ulazne brzine toka i smanjenju stupnja otvorenosti zatvarača može se očekivati dodatno povećanje totalnih tlakova do određenog stupnja zatvorenosti kada

vrijednost maksimalnog tlaka pada u odnosu na vrijednost kod prethodnog postotka zatvorenosti zatvarača.

Na slici 92. su prikazani središnji uzdužni profili s prikazima promjena totalnih tlakova uzduž cijevi za podmodele s 30° otvorenosti leptirastog zatvarača. Na gornjem dijelu slike (a)) prikazan je uzdužni profil kod podmodela s ulaznom brzinom toka od 1 m/s, dok je na donjem dijelu slike (b)) prikazan profil kod podmodela s ulaznom brzinom toka od 1,5 m/s. Raspodjele totalnih tlakova su identične, dok vrijednosti samih tlakova nisu jednake.



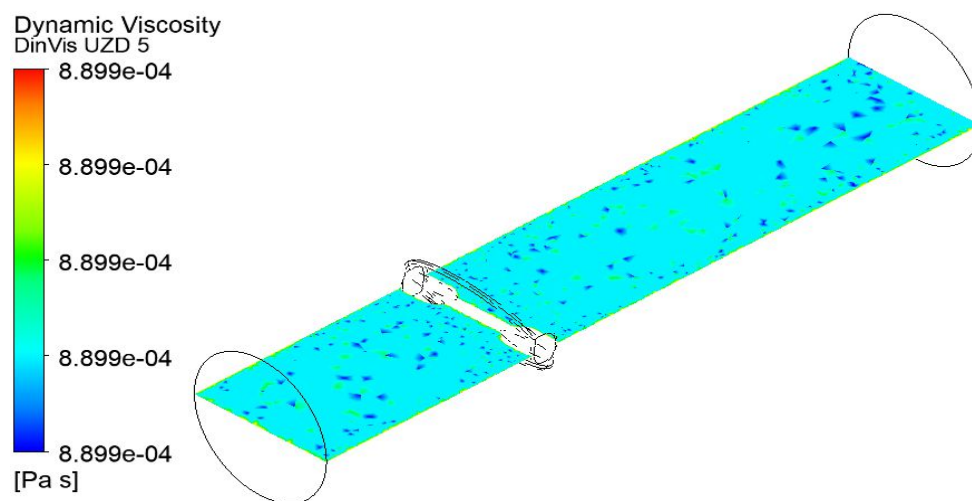
Slika 92. Raspodjela totalnih tlakova na središnjim uzdužnim profilima za podmodel leptirastog zatvarača s 30° otvorenosti: a) model s ulaznom brzinom 1 m/s, b) model s ulaznom brzinom 1,5 m/s

Maksimalne vrijednosti totalnih tlakova ne javljaju se na središnjem uzdužnom profilu. Maksimalne vrijednosti totalnih tlakova na promatranom središnjem uzdužnom profilu iznose 33,777 kPa za varijantu s ulaznom brzinom 1 m/s i 75,821 kPa za varijantu s ulaznom brzinom od 1,5 m/s za podmodel sa 30° otvorenosti, dok maksimalne vrijednosti

unutar cjelokupnog modela iznose 41,198 kPa, odnosno 92,658 kPa za model s većom ulaznom brzinom. Minimalne vrijednosti totalnog tlaka prethodno spomenute u tablici 25. također se ne pojavljuju na središnjem uzdužnom profilu. Minimalne vrijednosti totalnog tlaka koje se pojavljuju na promatranom profilu puno su veće od minimalnih vrijednosti unutar kompletnog modela.

5.2.4. Dinamička viskoznost

Dinamička viskoznost, također poznata kao apsolutna viskoznost i koeficijent viskoznosti η je mjera unutarnjeg otpora fluida pri toku. Njena vrijednost mjeri se u paskalsekundama (Pas). Dinamička viskoznost daje podatak o tome kolika je slika potrebna kako bi promatrani fluid tekao pri određenoj brzini. Dva fluida mogu imati jednaku dinamičku viskoznost, ali veoma različite kinematičke viskoznosti ovisno o gustoći i obrnuto [43]. Koeficijent viskoznosti glicerola na sobnoj temperaturi iznosi 1,4 Pas, vode 0,001 Pas, a zraka $17 \cdot 10^{-6}$ Pas. Dinamička viskoznost se smanjuje s povećanjem temperature, jer toplinsko gibanje smanjuje privlačne međumolekulske sile. Dinamičke viskoznosti različitih stakala, smole i slično, veoma su veliki, u pravilu veći od 109 Pas [44]. Dinamička viskoznost unutar modela leptirastih zatvarača konstantna je duž cijelog modela i iznosi 0,000889 Pas jer nema promjene temperature. Primjer vrijednosti dinamičke viskoznosti na središnjem uzdužnom profilu prikazana je na slici 93. Unutar slike nisu sve vrijednosti prikazane jednom bojom iz razloga što elementi mreže u pojedinim dijelovima nisu jednake veličine kao u ostatku mreže. Usprkos razlici u boji, u legendi na lijevom dijelu slike vidljivo je kako su vrijednosti dinamičke viskoznosti jednake kroz cijeli numerički model.



Slika 93. Varijabilnost dinamičke viskoznosti duž numeričkog modela leptirastog zatvarača

5.2.5. Vrtložna viskoznost

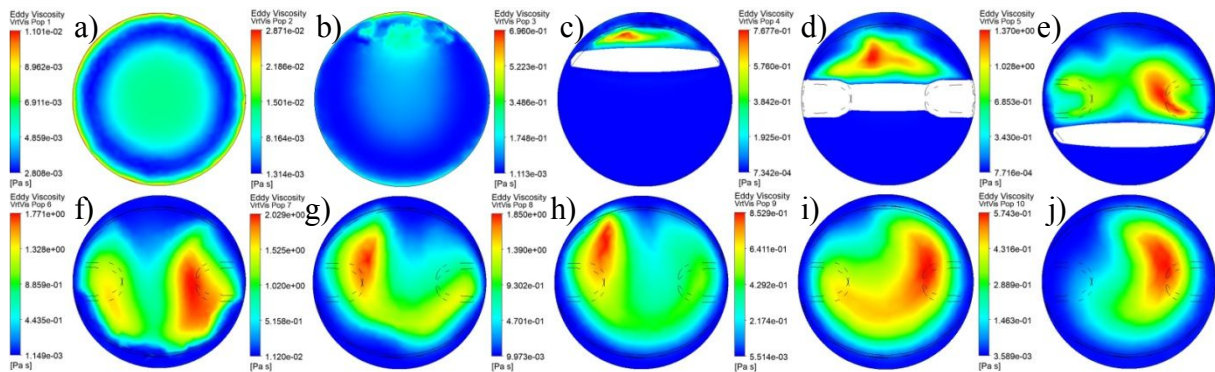
Vrtložna viskoznost je turbulentan prijenos momenata pomoću vrtloga koji povećavaju unutarnje trenje fluida, analogno molekularnoj viskoznosti u laminarnom toku, ali u puno većem razmjeru. Vrtložna viskoznost često se označava simbolom K [45]. Njena vrijednost mjeri se u paskalsekundama (Pas). Tablicom 27. dane su maksimalne, minimalne i srednje vrijednosti vrtložne viskoznosti za svaki numerički podmodel leptirastog zatvarača za obje varijante ulaznih brzina. Sve vrijednosti vrtložnih viskoznosti unutar tablice dane su u paskalsekundama (Pas).

Tablica 27. Prikaz maksimalnih, minimalnih i srednjih vrijednosti vrtložne viskoznosti za svaki od numeričkih modela leptirastog zatvarača

Stupanj otvorenosti zatvarača	v=1 m/s			v=1,5 m/s		
	Max [Pas]	Min [Pas]	Sr [Pas]	Max [Pas]	Min [Pas]	Sr [Pas]
30	1,41547	0,00013	0,11290	2,20293	0,00009	0,16900
60	0,21127	0,00039	0,00362	0,33656	0,00033	0,00487
90	0,02927	0,00022	0,00182	0,03562	0,00016	0,00221

Uočljivo je kako se maksimalne vrtložne viskoznosti javljaju kod numeričkog modela s većom ulaznom brzinom toka fluida i kod podmodela s najmanjim stupnjem otvorenosti leptirastog zatvarača. Naime, vrtložna viskoznost ovisi o brzini toka pa su dobiveni očekivani rezultati, kod manje otvorenosti zatvarača javljaju se veće brzine zbog manje protočne površine, pa su samim time i vrtložne viskoznosti veće kod tih podmodela. Najveća vrtložna viskoznost unutar obrađenih podmodela iznosi 2,20 Pas za podmodel s 30° otvorenosti i ulaznom brzinom toka od 1,5 m/s, dok za isti podmodel s ulaznom brzinom toka od 1 m/s iznosi 1,42 Pas. Razlike maksimalnih, minimalnih i srednjih vrijednosti između podmodela s 30° otvorenosti i podmodela s 90° otvorenosti su velike, na temelju čega se može reći kako vrijednost eksponencijalno raste, odnosno pada s stupnjem otvorenosti zatvarača. Primjerice, srednja vrijednost vrtložne viskoznosti kod podmodela s 30° otvorenosti zatvarača 62 puta je veća u usporedbi s podmodelom s potpunom otvorenosti pri jednakoj ulaznoj brzini toka. Teško je na temelju dobivenih rezultata predvidjeti kolika je očekivana vrtložna viskoznost za neki drukčiji podmodel ili za iste podmodele s različitim ulaznim brzinama toka, iz razloga što ne postoji jednostavna veza između dobivenih rezultata. Ono što se može pretpostaviti je da će se pri većim ulaznim brzinama toka za jednake podmodele pojaviti veće vrijednosti vrtložne viskoznosti. Nužno je promatrati maksimalne vrijednosti vrtložnih viskoznosti, jer pri većim vrijednostima dolazi do pojave vrtloga unutar modela što može utjecati na tok fluida i eventualno deformiranje cijevi. Na slici 94. su prikazane vrijednosti vrtložnih viskoznosti na poprečnim profilima podmodela s 30° otvorenosti i ulaznom brzinom toka 1,5

m/s iz razloga što se kod spomenutog podmodela javljaju najveće vrijednosti vrtložne viskoznosti. Na gornjem dijelu slike prikazani su prvih pet poprečnih profila (a), b), c), d) i e)), a na donjem dijelu slike sljedećih 5 profila koji se nalaze iza središnje osi zatvarača (f), g), h), i) i j)).



Slika 94. Raspodjela vrtložne viskoznosti na poprečnim profilima podmodela leptirastog zatvarača s 30° otvorenosti i ulaznom brzinom toka od 1,5 m/s

a) Profil 1, b) Profil 2, c) Profil 3, d) Profil 4, e) Profil 5, f) Profil 6, g) Profil 7, h) Profil 8, i) Profil 9, j) Profil 10

Na temelju poprečnih profila s prikazima vrtložnih viskoznosti vidljivo je kako se vrtlozi pojavljuju u području cijevi neposredno iza zatvarača pri na različitim pozicijama presjeka cijevi. Gledanjem profila danim redosljedom vidljiv je početak pojave vrtloga na trećem poprečnom profilu, te je moguće praćenje kretanja vrtloga duž cijevi sve do desetog poprečnog profila. U nastavku su u tablici 28. prikazane maksimalne, minimalne i srednje vrijednosti vrtložnih viskoznosti na poprečnim profilima za sve podmodele i obje ulazne brzine. Sve vrijednosti prikazane su u paskalsekundi (Pas). Na temelju tablice moguće je uočiti kod kojeg se profila pojavljuju maksimalne vrijednosti vrtložne viskoznosti. Ekstremne vrijednosti označene su podebljanim brojkama za svaki postotak otvorenosti leptirastog zatvarača kako bi se jednostavnije uočile ekstremne vrijednosti.

Maksimalna vrijednost vrtložne viskoznosti javlja se na sedmom profilu podmodela s 30° otvorenosti zatvarača i ulaznom brzinom od 1,5 m/s i iznosi 2,03 Pas što nije maksimalna vrijednost unutar cijelog numeričkog modela koja kao što je vidljivo iz tablice 27. iznosi 2,20 Pas. Dakle, najveća vrtložna viskoznost javlja se u blizini sedmog korisnički definiranog poprečnog profila, ali ne na njemu. Ekstremne vrijednosti maksimuma, minimuma i prosjeka javljaju se na jednakim profilima za obje varijante ulaznih brzina toka, pa je na temelju toga moguće zaključiti da će se najveće vrijednosti vrtložne viskoznosti za jednake podmodele s nekom drugom ulaznom brzinom javiti na jednakim profilima za pojedine stupnjeve

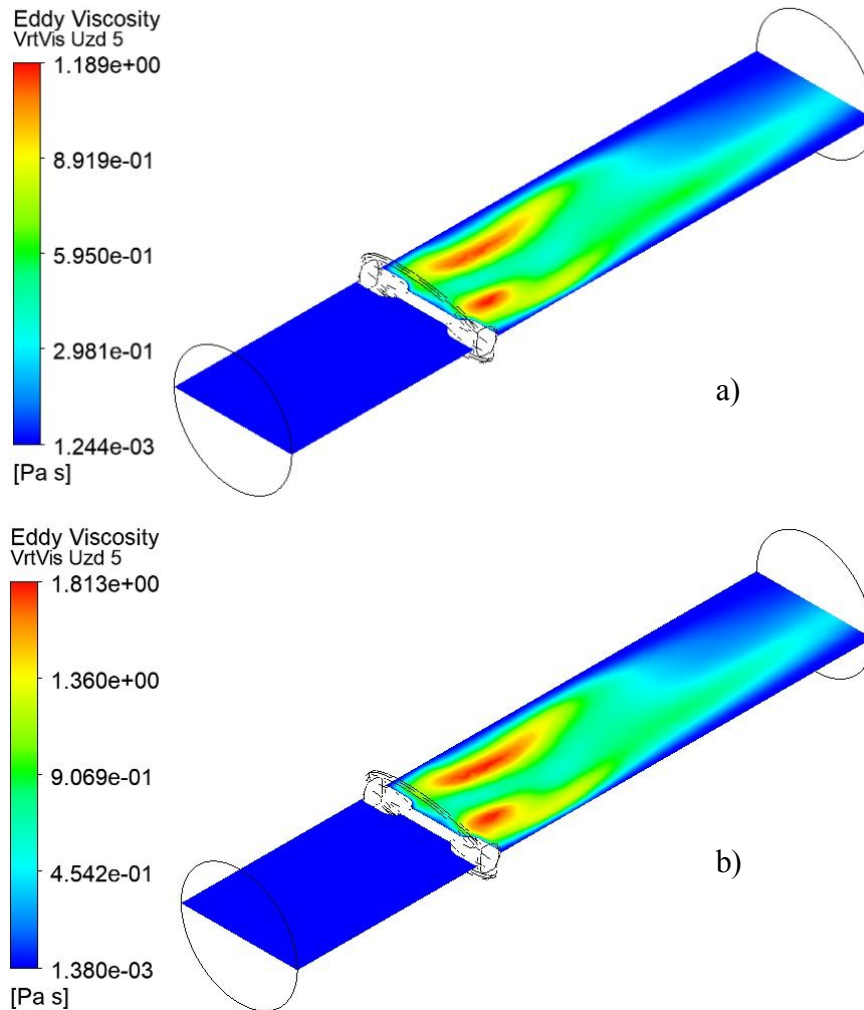
otvorenosti zatvarača. Uspoređujući podmodele jednakih varijanti uočljivo je kako se ekstremi ne javljaju na istim profilima, već zatvorenost zatvarača ima veliki utjecaj na mjesto pojave vrtloga i na njegovu duljinu, gledano po duljini cijevi. Vrtlozi se javljaju u blizini zatvarača, najčešće iza samog zatvarača.

Tablica 28. Prikaz vrijednost maksimalnih, minimalnih i srednjih vrijednost vrtložne viskoznosti na poprečnim profilima modela leptirastog zatvarača

Profil	v=1 m/s								
	30° otvorenosti			60° otvorenosti			90° otvorenosti		
	Max	Min	Sr	Max	Min	Sr	Max	Min	Sr
1	0,00794	0,00218	0,00415	0,00742	0,00174	0,00349	0,00782	0,00154	0,00354
2	0,02071	0,00099	0,00343	0,01199	0,00056	0,00337	0,00720	0,00080	0,00250
3	0,43840	0,00099	0,01320	0,13649	0,00060	0,00528	0,00750	0,00022	0,00235
4	0,49748	0,00066	0,05271	0,16167	0,00069	0,01038	0,01771	0,00039	0,00268
5	0,86438	0,00075	0,17815	0,19909	0,00060	0,03038	0,02226	0,00044	0,00280
6	1,17641	0,00093	0,36265	0,19305	0,00079	0,02693	0,02023	0,00041	0,00366
7	1,34961	0,00785	0,25480	0,14585	0,00156	0,01257	0,01239	0,00040	0,00275
8	1,16124	0,00678	0,25385	0,05694	0,00141	0,00689	0,00802	0,00044	0,00254
9	0,62575	0,00409	0,14085	0,02982	0,00134	0,00541	0,00743	0,00058	0,00243
10	0,39158	0,00248	0,06240	0,00977	0,00101	0,00331	0,00720	0,00038	0,00232

Profil	v=1,5 m/s								
	30° otvorenosti			60° otvorenosti			90° otvorenosti		
	Max	Min	Sr	Max	Min	Sr	Max	Min	Sr
1	0,01101	0,00281	0,00520	0,01026	0,00228	0,00447	0,01086	0,00196	0,00463
2	0,02871	0,00131	0,00393	0,01627	0,00069	0,00421	0,00999	0,00102	0,00337
3	0,69600	0,00111	0,01814	0,21031	0,00074	0,00714	0,01039	0,00017	0,00318
4	0,76769	0,00073	0,08003	0,25076	0,00080	0,01529	0,02492	0,00041	0,00351
5	1,36982	0,00077	0,27525	0,31786	0,00054	0,04716	0,02898	0,00050	0,00370
6	1,77067	0,00115	0,54825	0,30881	0,00098	0,04211	0,02613	0,00051	0,00449
7	2,02947	0,01120	0,41155	0,23749	0,00196	0,01958	0,01774	0,00030	0,00363
8	1,85035	0,00997	0,40875	0,09697	0,00194	0,01063	0,01118	0,00047	0,00336
9	0,85295	0,00551	0,21650	0,05221	0,00193	0,00826	0,01030	0,00074	0,00329
10	0,57426	0,00359	0,09656	0,01366	0,00148	0,00479	0,00997	0,00049	0,00317

Na slici 95. su prikazani središnji uzdužni profili s prikazima promjena vrtložne viskoznosti uzduž cijevi za numeričke podmodele s 30° otvorenosti leptirastog zatvarača. Na gornjem dijelu slike (a)) prikazan je uzdužni profil kod podmodela s ulaznom brzinom toka od 1 m/s, dok je na donjem dijelu slike (b)) prikazan profil kod podmodela s ulaznom brzinom toka od 1,5 m/s. Raspodjele vrtložnih viskoznosti su identične, dok vrijednosti samih iznosa vrtložnih viskoznosti nisu jednake kao što je vidljivo iz legende na lijevom dijelu slike.



Slika 95. Raspodjela vrtložne viskoznosti na središnjim uzdužnim profilima za podmodel s 30° otvorenosti: a) model s ulaznom brzinom toka 1 m/s, b) model s ulaznom brzinom toka 1,5 m/s

Maksimalne vrijednosti vrtložne viskoznosti ne javljaju se točno na središnjem uzdužnom profilu. Razlog tome je utjecaj geometrije zatvarača, ovisnost o stupnju otvorenosti, nejednolike brzine toka na gornjem i donjem protočnom profilu i slično. Maksimalna vrijednost vrtložne viskoznosti unutar modela s 30° otvorenosti leptirastog zatvarača i ulaznom brzinom od 1,5 m/s iznosi približno 2,203 Pas prema tablici 27., dok na središnjem modelu maksimalna vrijednost iznosi približno 1,813 Pas. Minimalne vrijednosti, također se ne javljaju na središnjem profilu što je vidljivo uspoređujući minimalne vrijednosti legenda s lijeve strane prethodne slike i vrijednosti iz tablice 27.

5.1.6. Kinetička energija turbulencije

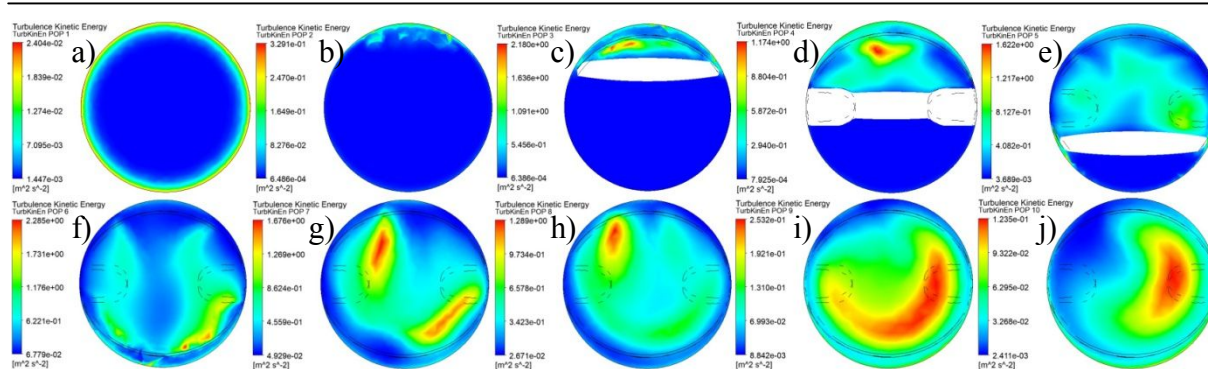
U dinamici fluida, kinetička energija turbulencije (*eng. turbulence kinetic energy – TKE*) je mjera kinetičke energije po jedinici mase koju se povezuje s vrtlozima u turbulentnim tokovima. Prema RANS jednadžbama (*eng. Reynolds-averaged Navier-Stokes equations*)

kinetička energija turbulencije može se računati prema turbulentnom modelu. Generalno se računa kao polovica sume varijanca (kvadrat standardnih devijacija) komponenata brzina toka. Kinetička energija turbulencije se označava slovom k [46]. Njena vrijednost mjeri se u m^2/s^2 ili J/kg . Tablicom 29. dane su maksimalne, minimalne i srednje vrijednosti kinetičke energije turbulencije za svaki podmodel leptirastog zatvarača za obje varijante ulaznih brzina. Sve vrijednosti kinetičke energije turbulencije unutar tablice dane su u m^2/s^2 .

Tablica 29. Prikaz maksimalnih, minimalnih i srednjih vrijednosti kinetičke energije turbulencije za svaki od numeričkih modela leptirastog zatvarača

Stupanj otvorenosti zatvarača	v=1 m/s			v=1,5 m/s		
	Max	Min	Sr	Max	Min	Sr
30	1,81828	0,00036	0,07866	4,36313	0,00063	0,16400
60	0,17279	0,00007	0,00274	0,40516	0,00017	0,00562
90	0,03470	0,00004	0,00090	0,07215	0,00008	0,00180

Maksimalna vrijednost kinetičke energije turbulencije se javlja kod podmodela s većom ulaznom brzinom i iznosi $4,363 \text{ m}^2/\text{s}^2$, odnosno J/kg za podmodel s 30° otvorenosti leptirastog zatvarača. Kod istog podmodela javlja se također i najveća minimalna vrijednost kinetičke energije turbulencije i iznosi $0,00063 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Vrijednost ekstrema kinetičke energije turbulencije kod podmodela s ulaznim brzinama toka od 1 m/s javlja se na istom podmodelu i iznosi $1,818 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Razlog tome je što je varijacija komponenata brzina toka veća kod varijante s većom ulaznom brzinom za spomenuti podmodel leptirastog zatvarača s 30° otvorenosti zatvarača. Bitno je spomenuti kako maksimalna srednja vrijednost kod varijante s ulaznom brzinom toka od $1,5 \text{ m/s}$ iznosi $0,164 \text{ m}^2/\text{s}^2$, dok maksimalna srednja kod varijante s ulaznom brzinom toka od 1 m/s iznosi samo $0,079 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Temeljem dobivenih rezultata teško je predvidjeti kolika je očekivana vrtložna viskoznost za neki drukčiji podmodel ili za iste podmodele s različitim ulaznim brzinama toka iz razloga što ne postoji jednostavna veza između dobivenih rezultata. Ono što se može pretpostaviti je da će se pri većim ulaznim brzinama za jednake podmodele pojaviti veće vrijednosti kinematičke energije turbulencije. Njihove iznose moguće je jedino približno predvidjeti bez velike preciznosti. Na slici 96. su prikazane vrijednosti kinematičke energije turbulencije na poprečnim profilima podmodela s 30° otvorenosti zatvarača i ulaznom brzinom toka od $1,5 \text{ m/s}$ iz razloga što se kod spomenutog podmodela javlja najveća vrijednost kinetičke energije turbulencije, iako ta vrijednost nije ujedino i najveća vrijednost unutar cijelog numeričkog modela. Na gornjem dijelu slike prikazano je prvih pet poprečnih profila (a), b), c), d), e)), a na donjem dijelu slike profili (f), g), h), i) i j)).



Slika 96. Raspodjela kinetičke energije turbulencije na poprečnim profilima podmodela leptirastog zatvarača s 30° otvorenosti i ulaznom brzinom toka od 1,5 m/s
a) Profil 1, b) Profil 2, c) Profil 3, d) Profil 4, e) Profil 5, f) Profil 6, g) Profil 7, h) Profil 8, i) Profil 9, j) Profil 10

Na temelju poprečnih profila s prikazima raspodjele kinetičke energije turbulencije vidljivo je kako se maksimalne vrijednosti kinetičke energije turbulencije javljaju iza leptirastog zatvarača šireći se od gornje protočne površine između zatvarača i cijevi prema ostatku cijevi uzduž iza zatvarača. Maksimalna vrijednost koja se pojavljuje na prikazanim profilima iznosi $2,285 \text{ m}^2/\text{s}^2$ na posljednjem poprečnom profilu, što nije ujedno i maksimum unutar cijelog numeričkog modela. Maksimalna vrijednost kinetičke energije turbulencije od $4,363 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ne pojavljuje se ni na jednom korisnički definiranom profilu. U nastavku su u tablici 30. prikazane maksimalne, minimalne i srednje vrijednosti kinetičke energije turbulencije na poprečnim profilima za sve numeričke podmodele i obje ulazne brzine toka. Sve vrijednosti prikazane su u m^2/s^2 . Na temelju tablice moguće je uočiti kod kojeg se profila pojavljuju maksimalne vrijednosti vrtložne viskoznosti. Ekstremne vrijednosti kinetičke energije turbulencije označene su podebljanim brojkama za svaki postotak otvorenosti leptirastog zatvarača kako bi se jednostavnije uočile ekstremne vrijednosti.

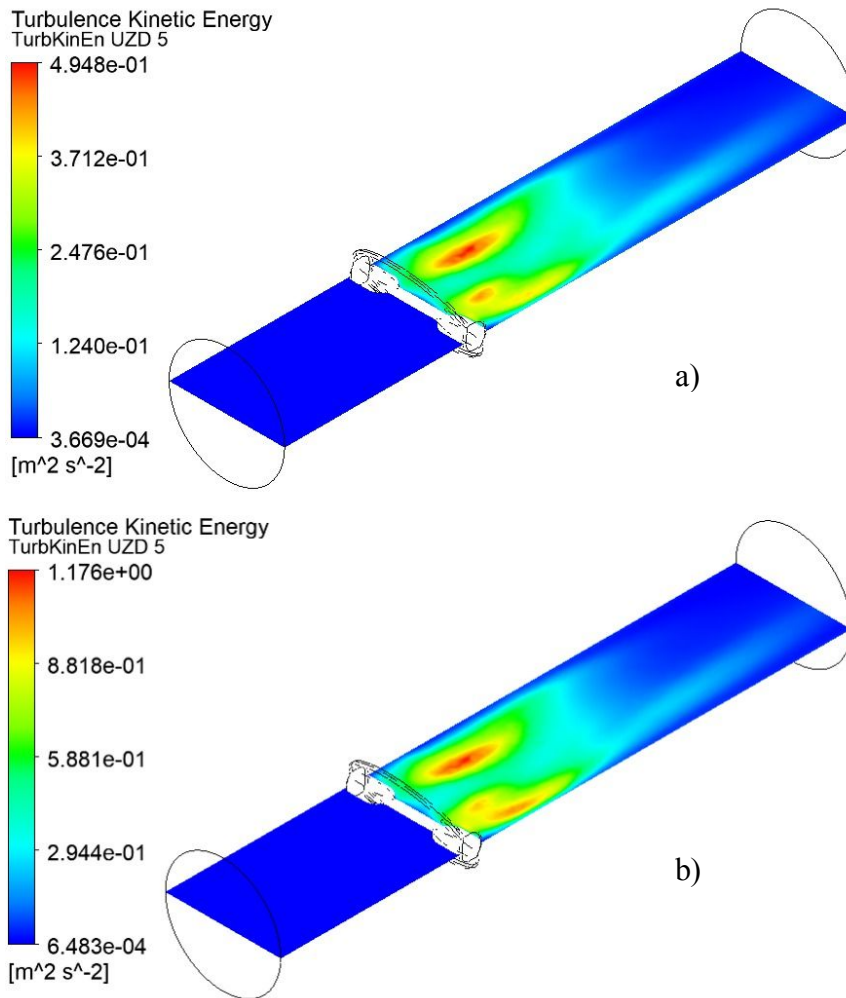
Maksimalna kinetička energija turbulencije javlja se na šestom poprečnom profilu profilu podmodela s 30° otvorenosti zatvarača i ulaznom brzinom toka od 1,5 m/s i iznosi $2,285 \text{ m}^2/\text{s}^2$ što nije maksimalna vrijednost unutar cijelog numeričkog modela. Dakle, najveća vrijednost kinetičke energije turbulencije javlja se u području u kojemu nije definiran poprečni profil. Ekstremne vrijednosti maksimuma, minimuma i prosjeka javljaju se na jednakim profilima za obje varijante ulaznih brzina toka. Mjenjanjem stupnja otvorenosti zatvarača maksimalne vrijednosti kinetičke energije turbulencije mjenjaju svoj položaj, odnosno kinetička energija turbulencije ne javlja se uvijek na istom profilu i položaju iz razloga što dolazi do pojave različitih varijacija brzine toka.

Tablica 30. Prikaz vrijednosti maksimalnih, minimalnih i srednjih vrijednost kinematičke energije turbulencije na poprečnim profilima leptirastog zatvarača

Profil	v=1 m/s								
	30° otvorenosti			60° otvorenosti			90° otvorenosti		
	Max	Min	Sr	Max	Min	Sr	Max	Min	Sr
1	0,01210	0,00084	0,00328	0,01408	0,00059	0,00345	0,01165	0,00047	0,00331
2	0,16606	0,00037	0,00601	0,03279	0,00031	0,00391	0,01396	0,00018	0,00306
3	0,98880	0,00036	0,05219	0,16339	0,00025	0,00725	0,01343	0,00011	0,00296
4	0,45820	0,00046	0,07138	0,08303	0,00022	0,00884	0,01568	0,00010	0,00343
5	0,80408	0,00229	0,12595	0,07255	0,00025	0,01312	0,03197	0,00008	0,00482
6	1,10382	0,02709	0,22385	0,07909	0,00052	0,01463	0,02046	0,00007	0,00361
7	0,73160	0,02282	0,17390	0,03897	0,00136	0,00986	0,01666	0,00008	0,00351
8	0,51671	0,01050	0,13110	0,03543	0,00068	0,00673	0,01416	0,00013	0,00299
9	0,12825	0,00497	0,04836	0,02875	0,00056	0,00562	0,01343	0,00012	0,00299
10	0,05567	0,00106	0,01815	0,02268	0,00029	0,00417	0,01315	0,00005	0,00291

Profil	v=1,5 m/s								
	30° otvorenosti			60° otvorenosti			90° otvorenosti		
	Max	Min	Sr	Max	Min	Sr	Max	Min	Sr
1	0,02404	0,00145	0,00644	0,02956	0,00101	0,00686	0,02326	0,00079	0,00657
2	0,32911	0,00065	0,01187	0,06442	0,00053	0,00767	0,02954	0,00029	0,00616
3	2,18046	0,00064	0,10870	0,38261	0,00042	0,01485	0,02737	0,00019	0,00596
4	1,17362	0,00079	0,15625	0,19052	0,00037	0,01863	0,03257	0,00018	0,00699
5	1,62175	0,00369	0,28055	0,16461	0,00042	0,02886	0,06691	0,00014	0,00983
6	2,28518	0,06779	0,50700	0,17818	0,00095	0,03195	0,04381	0,00013	0,00707
7	1,67553	0,04930	0,41085	0,08585	0,00259	0,02096	0,03381	0,00016	0,00706
8	1,28891	0,02671	0,31325	0,06989	0,00134	0,01398	0,02853	0,00026	0,00600
9	0,25320	0,00884	0,10685	0,05675	0,00117	0,01160	0,02707	0,00022	0,00602
10	0,12349	0,00241	0,04021	0,04504	0,00062	0,00846	0,02832	0,00009	0,00586

Na slici 97. su prikazani središnji uzdužni profili s prikazima promjena kinetičke energije turbulencije uzduž cijevi za podmodele s 30° otvorenosti leptirastog zatvarača. Na gornjem dijelu slike (a)) prikazan je uzdužni profil kod podmodela s ulaznom brzinom toka od 1 m/s, dok je na donjem dijelu slike (b)) prikazan profil kod podmodela s ulaznom brzinom toka od 1,5 m/s. Raspodjele kinetičke energije turbulencije su podjednake, dok vrijednosti samih iznosa nisu jednake kao što je vidljivo iz legende na lijevom dijelu slike.



Slika 97. Raspodjela kinetičke energije turbulencije na središnjim uzdužnim profilima za podmodel s 30° otvorenosti leptirastog zatvarača: a) model s ulaznom brzinom toka od 1 m/s, b) model s ulaznom brzinom toka od 1,5 m/s

Maksimalne vrijednosti kinetičke energije turbulencije ne javljaju se na središnjem uzdužnom profilu. Razlog toga je što se maksimalne varijacije brzina toka ne javljaju točno na sredini cijevi. Maksimalna vrijednost kinetičke energije turbulencije unutar modela s 30° otvorenosti zatvarača i ulaznom brzinom toka od 1,5 m/s iznosi približno $4,363 \text{ m}^2/\text{s}^2$ prema tablici 29., dok na središnjem modelu maksimalna vrijednosti iznosi samo $1,176 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Minimalne vrijednosti također se ne javljaju na središnjem profilu što je vidljivo uspoređujući minimalne vrijednosti legenda s lijeve strane prethodne slike i vrijednosti iz tablice 29.

5.2.7. Mjera deformacije smicanjem

Mjera deformacije smicanjem je skalarna vrijednost koja se označava grčkim slovom gama (γ) i prikazuje se u mjernim jedinicama (s^{-1}). U mehanici fluida mjera deformacije smicanjem nikada nije konstantna za konstantnu deformaciju smicanjem. Mjera deformacije

smicanjem proporcionalna je deformaciji smicanjem ukoliko je brzina toka konstantna što kod obrađivanih numeričkih modela nije slučaj. Veća mjera deformacije smicanjem označava da je fluid više deformiran u usporedbi s nižom mjerom deformacije smicanjem pri konstantnom vremenu (t) [47]. Mjera deformacije smicanjem kod obrađenih modela ovisi o „struganju“ fluida o zatvarač i o stijenku cijevi. Tablicom 31. dane su maksimalne, minimalne i srednje vrijednosti mjere deformacije smicanjem za svaki podmodel leptirastog zatvarača za obje varijante ulaznih brzina toka. Sve vrijednosti kinetičke energije turbulencije unutar tablice dane su u s^{-1} .

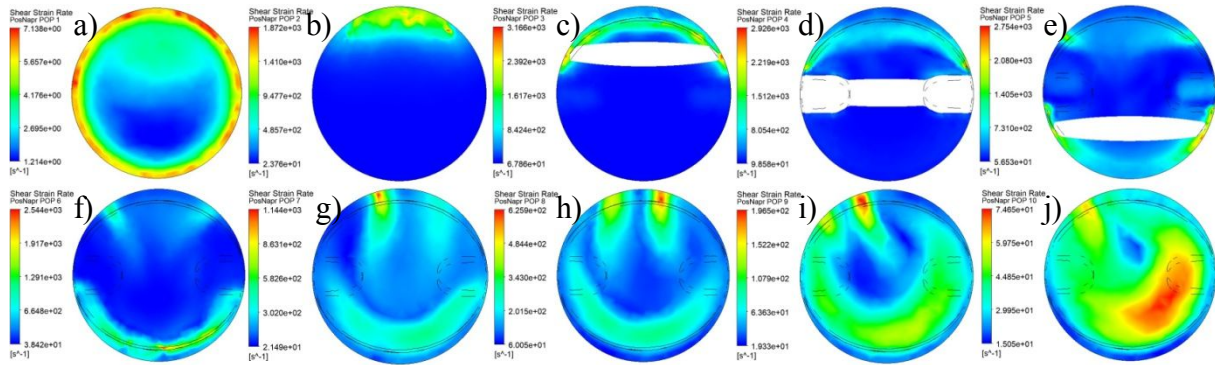
Tablica 31. Prikaz maksimalnih, minimalnih i srednjih vrijednosti mjere deformacije smicanjem za svaki od numeričkih modela leptirastog zatvarača

Stupanj otvorenosti zatvarača	v=1 m/s			v=1,5 m/s		
	Max	Min	Sr	Max	Min	Sr
30	37179,00	0,11	177,40	63500,00	0,16	270,41
60	1650,19	0,08	27,26	2494,93	0,12	41,52
90	552,39	0,07	5,98	834,99	0,09	8,71

Minimalne vrijednosti mjere deformacije smicanjem gotovo su jednake unutar obje varijante za sve postotke zatvorenosti zatvarača i iznose u prosjeku $0,09 s^{-1}$ kod varijante s ulaznom brzinom toka od 1 m/s i $0,12 s^{-1}$ kod varijante s ulaznom brzinom toka od 1,5 m/s. Maksimalne i prosječne vrijednosti eksponencijalno se smanjuju s povećanjem stupnja otvorenosti zatvarača. Maksimalna vrijednost mjere deformacije smicanjem iznosi $37179 s^{-1}$ kod varijante s ulaznom brzinom toka od 1 m/s i $63500 s^{-1}$ kod varijante s ulaznom brzinom toka od 1,5 m/s. Prosječna mjera deformacije smicanjem kod podmodela s 30° otvorenosti zatvarača 30 je puta manja nego prosječna mjera deformacije smicanjem kod podmodela s potpunom otvorenosti za istu ulaznu brzinu toka. Na slici 98. su prikazane vrijednosti mjere deformacije smicanjem na poprečnim profilima podmodela s 30° otvorenosti i ulaznom brzinom toka 1,5 m/s. Na gornjem dijelu slike prikazano je prvih pet profila (a), b), c), d), e)), a na donjem dijelu slike sljedećih pet profila (f), g), h), i) i j)).

Maksimalna vrijednost na prikazanim profilima javlja se na poprečnom profilu zatvarača i iznosi $3166 s^{-1}$ što nije maksimalna vrijednost unutar cijelog modela već samo na jednom od korisnički definiranih poprečnih profila. Maksimalna vrijednost ne javlja se na korisnički definiranim poprečnim niti uzdužnim profilima. Prilikom toka gotovo konstantnom brzinom kod podmodela a) vidljivo je kako se najveće vrijednosti mjere posmičnih naprezanja javljaju uz stijenku cijevi, dok se kasnije to mijenja zbog položaja i stupnja otvorenosti

zatvarača. Za očekivati je kako će se maksimalne vrijednosti posmičnih naprezanja javiti na prednjoj ili stražnjoj stijenci ploče zatvarača.

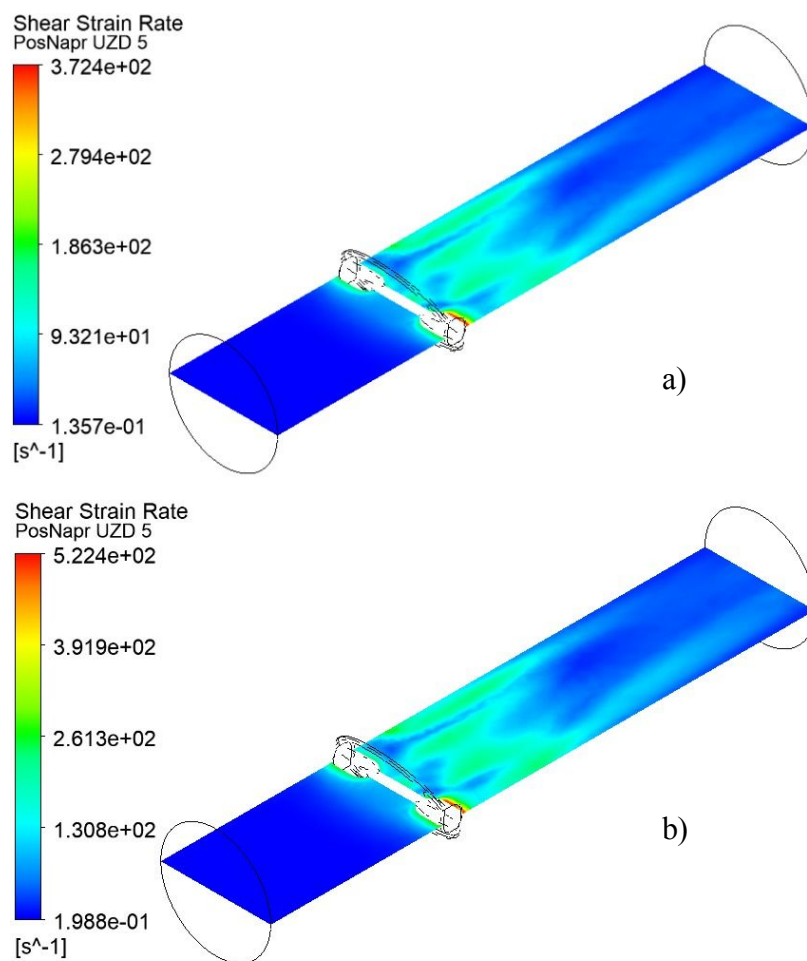


Slika 98. Raspodjela mjera posmičnih naprezanja na poprečnim profilima podmodela leptirastog zatvarača s 30° otvorenosti i ulaznom brzinom toka od 1,5 m/s

a) Profil 1, b) Profil 2, c) Profil 3, d) Profil 4, e) Profil 5, f) Profil 6, g) Profil 7, h) Profil 8, i) Profil 9, j) Profil 10

Na slici 99. su prikazani središnji uzdužni profili s prikazima promjena mjera posmičnih naprezanja uzduž cijevi za podmodele s 30° otvorenosti leptirastog zatvarača. Na gornjem dijelu slike 99.a) prikazan je uzdužni profil kod podmodela s ulaznom brzinom toka od 1 m/s, dok je na donjem dijelu slike 99.b) prikazan profil kod podmodela s ulaznom brzinom toka od 1,5 m/s. Raspodjele mjere posmičnih naprezanja su podjednake, dok vrijednosti samih iznosa nisu jednake kao što je vidljivo iz legende na lijevom dijelu slike.

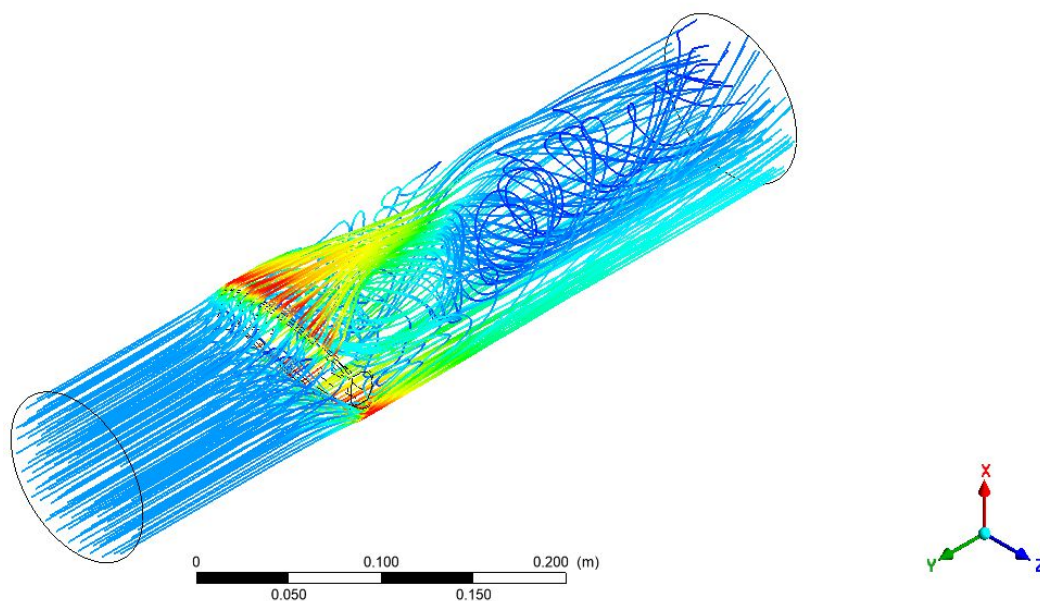
S grafičkog prikaza mjere posmičnog naprezanja na središnjim uzdužnim profilima je teško razaznati točan položaj maksimalnih vrijednosti iz razloga što se te maksimalne vrijednosti javljaju na malom dijelu, iako su u ovom slučaju veoma uočljive na spoju tijela zatvarača i cijevi. Maksimalne vrijednosti koje se pojavljuju na središnjim profilima iznose $372,44 \text{ s}^{-1}$ za podmodel pločastog zatvarača s 30° otvorenosti i ulaznom brzinom toka od 1 m/s i $522,41 \text{ s}^{-1}$ za podmodel pločastog zatvarača s 30° otvorenosti i ulaznom brzinom toka od 1,5 m/s. Maksimalne vrijednosti na središnjim uzdužnim profilima nisu ujedno i maksimalne vrijednosti unutar cijelog modela. Poziciju maksimalne vrijednosti teško je odrediti, no za pretpostaviti je kako se nalazi na disku zatvarača.



Slika 99. Raspodjela mjere posmičnog naprezanja na središnjim uzdužnim profilima za podmodel leptirastog zatvarača s 30° otvorenosti: a) model s ulaznom brzinom toka od 1 m/s, b) model s ulaznom brzinom toka od 1,5 m/s

5.2.8. Brzine toka u smjerovima u , v i w

Unutar obrade rezultata u ANSYS Workbench programskog paketa moguće je odabrati prikaz vrijednosti brzina toka u (u smjeru osi x), v (u smjeru osi y) i w (u smjeru osi z). Slikom 100. je prikazan model sa strujnicama. U donjem desnom uglu slike označeni su smjerovi osi x , y i z . Za svaki podmodel smjerovi osi usmjereni su jednakom smjeru kao na slici.



Slika 100. Prikaz strujnicama za brzinu toka uzduž vodoopskrbne cijevi

U nastavku su u tablici 32. dane maksimalne, minimalne i srednje vrijednosti brzina u smjeru u , tablicom 33. u smjeru v i tablicom 34. u smjeru w . Negativan iznos označuje smjer brzine suprotan od pozitivnog smjera osi. Glavni smjer toka, odnosno orijentacije cijevi je negativan smjer osi y , pa zbog toga u pravilu svaka negativna vrijednost brzine u smjeru v zapravo predstavlja brzinu u smjeru glavnog toka, dok one pozitivne u smjeru v predstavljaju brzine u smjeru suprotnom glavom toku. Negativna vrijednost brzine u smjeru u (os x) predstavlja djelovanje brzine u smjeru sile gravitacije, dok pozitivna predstavlja djelovanje brzine u smjeru suprotnom sili gravitacije. Brzina w (u smjeru osi z) najmanje je bitna zbog najmanjeg utjecaja, jer predstavlja brzinu u smjeru kod kojeg se očekuju pojave najmanjih brzina svih smjerova. Razlog tome je što os z siječe cijev paralelno s diskom leptirastog zatvarača zatvarača pri potpunoj zatvorenosti i u smjeru osi z nema nikakvih dodatnih utjecaja (npr. sila gravitacije ili dodatan bočni dotok).

Tablica 32. Prikaz maksimalnih, minimalnih i srednjih vrijednosti brzine toka u smjeru osi x (brzina u) za svaki od modela leptirastog zatvarača

Stupanj otvorenosti zatvarača	$v=1$ m/s			$v=1,5$ m/s		
	Max	Min	Sr	Max	Min	Sr
30	4,80145	-4,48752	0,02655	7,20504	-6,74129	0,09838
60	2,38923	-0,88106	0,02346	3,57157	-1,32353	0,03672
90	0,88502	-0,88355	0,00145	1,33429	-1,33282	0,00207

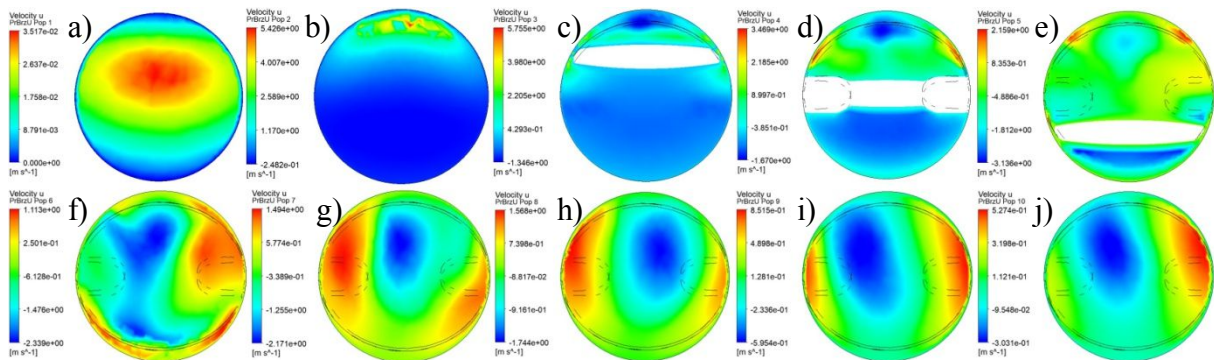
Tablica 33. Prikaz maksimalnih, minimalnih i srednjih vrijednosti brzine toka u smjeru osi y (brzina v) za svaki od modela leptirastog zatvarača

Stupanj otvorenosti zatvarača	$v=1$ m/s			$v=1,5$ m/s		
	Max	Min	Sr	Max	Min	Sr
30	2,81862	-8,34750	-1,89900	4,20023	-12,50690	-2,85900
60	1,18195	-2,45977	-1,15400	1,73986	-3,68771	-1,72900
90	1,56874	-0,60348	-1,02300	2,36336	-0,90571	-1,53300

Tablica 34. Prikaz maksimalnih, minimalnih i srednjih vrijednosti brzine toka u smjeru osi z (brzina w) za svaki od modela leptirastog zatvarača

Stupanj otvorenosti zatvarača	$v=1$ m/s			$v=1,5$ m/s		
	Max	Min	Sr	Max	Min	Sr
30	2,63928	-2,67611	0,00169	3,99113	-4,01130	0,00278
60	1,03859	-1,08562	0,00280	1,55881	-1,62994	0,00414
90	0,67152	-0,60413	-0,00009	1,01145	-0,90882	-0,00036

Uspoređujući prethodne tablice potvrđena je pretpostavka kako će ekstremne vrijednosti brzine toka u smjeru osi z biti manje od ekstremnih vrijednosti brzina toka u smjeru osi x i y . Najveća brzina se naravno pojavljuje u smjeru osi y (brzina v) s negativnom vrijednosti što predstavlja brzinu fluida u smjeru glavnog toka i spomenuta brzina toka iznosi 12,51 m/s za podmodel leptirastog zatvarača s 30° otvorenosti s ulaznom brzinom od 1,5 m/s i 8,35 m/s za podmodel s ulaznom brzinom toka od 1 m/s. Najveća brzina u smjeru osi x (brzina u) usmjerena je u suprotnom smjeru od smjera sile gravitacije i iznosi 7,21 m/s za podmodel leptirastog zatvarača s 30° otvorenosti s ulaznom brzinom od 1,5 m/s i 4,80 m/s za podmodel s ulaznom brzinom toka od 1 m/s. Najveća brzina koja se javlja u negativnom smjeru osi z (brzina w) iznosi 4,01 m/s za podmodel leptirastog zatvarača s 30° otvorenosti i ulaznom brzinom toka od 1,5 m/s i 2,68 m/s za podmodel s ulaznom brzinom toka od 1 m/s. Slikom 101. su prikazani poprečni profili s prikazom vrijednosti brzina toka u smjeru osi x (brzina u) za podmodel s postotkom otvorenosti zatvarača od s 30° i ulaznom brzinom toka od 1,5 m/s. Na gornjem dijelu slike prikazano je prvih 5 profila (a), b), c), d), e)), a na donjem dijelu slike posljednjih 5 profila (f), g), h), i) i j)).

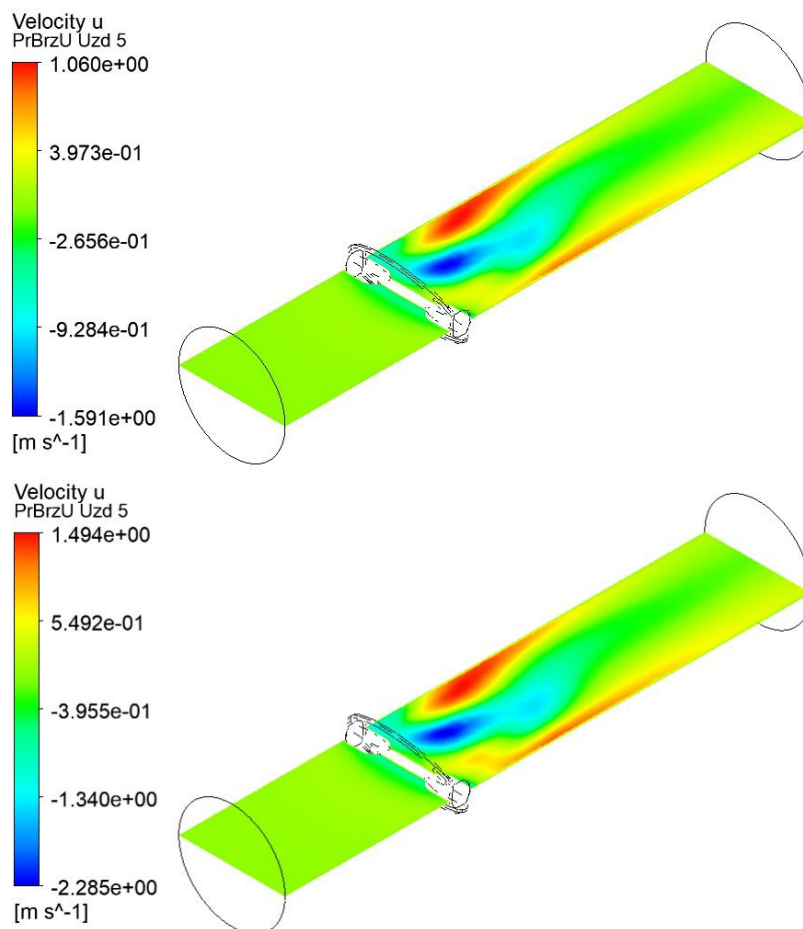


Slika 101. Raspodjela brzina u smjeru osi x (brzina u) na poprečnim profilima podmodela leptirastog zatvarača s 30° otvorenosti i ulaznom brzinom toka od 1,5 m/s
a) Profil 1, b) Profil 2, c) Profil 3, d) Profil 4, e) Profil 5, f) Profil 6, g) Profil 7, h) Profil 8, i) Profil 9, j) Profil 10

Maksimalna vrijednost na prikazanim profilima javlja se na trećem korisnički definiranom poprečnom profilu koji sječe gornju polovicu zatvarača i iznosi 5,76 m/s što nije maksimalna vrijednost unutar cijelog modela već samo maksimalna vrijednost koja se javlja na poprečnim profilima. Maksimalna vrijednost ne javlja se na korisnički definiranim poprečnim niti uzdužnim profilima. Na slici 102. su prikazani središnji uzdužni profili s prikazima promjena brzina toka u smjeru osi x (brzina u) uzduž vodoopskrbne cijevi za podmodele s 30° otvorenosti leptirastog zatvarača. Na gornjem dijelu slike (a) prikazan je uzdužni profil kod podmodela s ulaznom brzinom toka od 1 m/s, dok je na donjem dijelu slike (b)) prikazan profil kod podmodela s ulaznom brzinom toka od 1,5 m/s. Raspodjele brzina u smjeru osi x (brzina u) su podjednake, dok vrijednosti samih iznosa nisu jednake kao što je vidljivo iz legende na lijevom dijelu slike.

S grafičkog prikaza brzina u smjeru osi x (brzina u) na središnjim uzdužnim profilima je teško razaznati točan položaj maksimalnih vrijednosti brzina toka iz razloga što se te maksimalne vrijednosti javljaju na dugom pojasu u blizini stijenke cijevi, dok su na ostalim dijelovima raspodjele većinom jednake kroz cijeli numerički model, pa je grafički teško uočiti na kojim se dijelovima točno pojavljuje ekstrem brzine u . U svakom slučaju, maksimalna vrijednost na promatranom profilu javlja se u području iza zatvarača. Maksimalne vrijednosti koje se pojavljuju na središnjim profilima iznose 1,06 m/s za podmodel leptirastog zatvarača s 30° otvorenosti i ulaznom brzinom toka od 1 m/s i 1,49 m/s za podmodel leptirastog zatvarača

s 30° otvorenosti i ulaznom brzinom toka od 1,5 m/s. Maksimalne vrijednosti na središnjim uzdužnim profilima nisu ujedno i maksimalne vrijednosti unutar cijelog numeričkog modela.

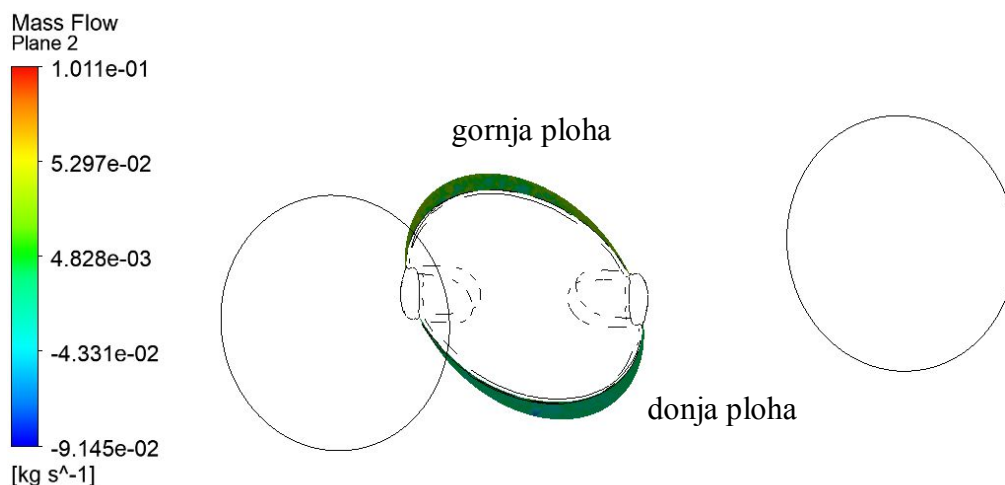


Slika 102. Raspodjela brzina toka u smjeru osi x (brzina u) na središnjim uzdužnim profilima za podmodel leptirastog zatvarača s 30° otvorenosti: a) model s ulaznom brzinom toka od 1 m/s, b) model s ulaznom brzinom toka od 1,5 m/s

5.2.9. Usporedba masenih protoka

Protok koji je moguće računati dijeli se na volumni i maseni. Maseni protok predstavlja masu fluida koja prolazi kroz neku točku u jedinici vremena. Mjeri se u kg/s i određuje se kao omjer promjene mase u vremenu toka promatranog fluida. S ciljem usporedbe i dobivanja preciznijih informacija o tome koliki protok prostruji s gornje, a koliki s donje strane zatvarača pri specifičnim stupnjevima otvorenosti proveden je izračun masenih protoka na obje protočne površine kod leptirastog zatvarača kod modela s ulaznom brzinom od 1 m/s. Izračunom normala zatvarača za svaki stupanj otvorenosti dodane su dvije dodatne plohe koje prolaze kroz centralnu os ploče leptirastog zatvarača. Svaka od tih ploha definirana je na

način da pokriva protočni profil s jedne strane leptirastog zatvarača. Položaj ploha kod modela s 30° otvorenosti leptirastog zatvarača prikazan je slikom 103. gdje su plohe označene zelenom bojom. Integriranjem površina za tražene masene protoke na korisnički zadanim plohama uz pomoć tabličnog izračuna unutar obrade rezultata izračunate su vrijednosti masenih protoka za obje površine i sve obrađene modele.



Slika 103. Položaji gornje i donje korisnički definirane plohe kod podmodela leptirastog zatvarača s 30° otvorenosti

Tablicom 35. su prikazane izračunate vrijednosti masenog protoka na korisnički zadanim plohama za. Vrijednosti su iskazane u kg/s. Dobivene vrijednosti ukazuju kako je kod manjeg stupnja otvorenosti, odnosno 30° otvorenosti maseni protok nešto veći na donjoj plohi, a kod 60° otvorenosti leptirastog zatvarača veći maseni protok javlja se na gornjoj plohi što je i očekivani rezultat iz brojnih razloga, veće brzine, pojave kavitacije i vrtloga iza zatvarača u donjem dijelu cijevi, u pravilu s gornje strane zatvarača, tj. na gornjoj plohi dolazi do manjeg otpora tečenju. Maksimalna vrijednost masenih protoka za obrađene stupnjeve otvorenosti leptirastog zatvarača od 4,146 kg/s javlja se upravo kod 60° otvorenosti. Usporedbom masenih protoka gornje i donje plohe modela s potpunom otvorenošću dobivaju se jednake vrijednosti masenog protoka za obje plohe, što je ujedino i pokazatelj pravilnog modeliranja, iz razloga što su dobiveni očekivani rezultati.

Tablica 35. Maseni protoci na korisnički definiranim plohama

Stupanj otvorenosti zatvarača	v=1 m/s	
	Gornja ploha	Donja ploha
30	3,938	4,046
60	4,146	3,835
90	3,989	3,989

6. ZAKLJUČAK

U radu je provedena hidraulička analiza za modele pločastih i leptirastih zatvarača koristeći Ansysov programski paket, odnosno studentsku verziju Ansys CFX 19.1 računalnog programa. Analize su provedene za 4 stupnja otvorenosti pločastog zatvarača i 3 stupnja otvorenosti leptirastog zatvarača. Obradene su dvije varijante s različitim ulaznim brzinama toka od 1 m/s i 1,5 m/s s ciljem usporedbe modela i utvrđivanja veze između modela za analizirane fizikalne veličine. Glavni cilj provedbe analize bio je odrediti pozicije pojavljivanja ekstremnih vrijednosti analiziranih fizikalnih veličina i njihovih vrijednosti. Nakon utvrđivanja veza temeljem kojih je moguće predvidjeti ekstremne vrijednosti, postoji mogućnost prognoziranja vrijednosti koje bi se mogle pojaviti kod stvarnih zatvarača jednakih karakteristika (geometrije) kao kod obrađenih modela. Na taj način se postiže kriterij za pravilno dimenzioniranje i postavljanje zatvarača unutar cijevi. Korištenjem poznatih ekstremnih veličina omogućuje se bolja funkcionalnost zatvarača i bolja prilagodljivost uvjetima koji se mogu javiti, jer su već predviđeni. Analizirane fizikalne veličine uključuju brzinu toka, relativan tlak, totalan tlak, brzine u smjerovima osi x , y i z , dinamičku viskoznost, vrijednost kinetičke energije turbulencije, vrtložnu viskoznost i mjeru deformacije smicanjem.

U hidrauličku analizu i numeričko modeliranje krenulo se sa sljedećim pretpostavkama:

- postoji mogućnost pojave kavitacije iza zatvarača
- postoji mogućnost pojave vrtloga u sustavu
- povećanjem ulaznih parametara doći će do povećanja promatranih fizikalnih vrijednosti unutar modela
- između dviju varijanti ulaznih brzina za jednaku geometriju moći će se napraviti veza za predviđanje vrijednosti pojedinih fizikalnih veličina pri nekoj trećoj varijanti ulaznih brzina
- smanjenjem protočne površine povećati će se brzine i tlakovi unutar modela
- maksimalne vrijednosti fizikalnih veličina brzine toka i tlakova javiti će se u blizini zatvarača.

Nakon provedenih analiza ustanovljeno je kako se kod svih modela pojavljuju kavitacija i vrtlog u području iza zatvarača, pogotovo pri manjim stupnjevima otvorenosti zatvarača, čime su dokazane i zadovoljene prve dvije pretpostavke. Pojava vrtloga i njegovo kretanje duž cijevi jasno je vidljiva na danim središnjim uzdužnim profilima kod modela kod kojih se javljaju. Treća pretpostavka je dokazana usporedbom jednakih modela s različitim ulaznim

brzinama toka. Primjerice, kod modela pločastog zatvarača s 40% zatvorenosti i ulazne brzine toka od 1 m/s maksimalna brzina koja se pojavljuje iznosi 2,533 m/s, dok kod istog modela i ulazne brzine toka od 1,5 m/s iznosi 3,797 m/s. Omjer brzina toka jednak je i za ostale stupnjeve otvorenosti zatvarača, što omogućuje vrlo jednostavno predviđanje maksimalnih brzina za jednaki model s različitim ulaznim brzinama čime su potvrđene treća i četvrta pretpostavka. Naravno, nisu veze svih fizikalnih veličina jednostavne poput spomenutog odnosa brzina između modela, pa određivanje veza uključuje dodatne matematičke analize unutar čega u ovom radu nije uloženo. Primjer predviđanja vrijednosti unutar analiza je obavljen grafički i numerički za pojedine fizikalne veličine s jednostavnim vezama. Uz pomoć računanja vrijednosti koje bi se mogle javiti u modelu i omogućavanjem pravilnog dimenzioniranja izbjegavaju se pojave potencijalnih štetnih događaja unutar cijevi. Kroz provedenu analizu dokazano je i kako se maksimalne vrijednosti brzina, tlakova i ostalih fizikalnih veličina javljaju kod modela s manjim stupnjem/postotkom otvorenosti. Maksimalne vrijednosti fizikalnih veličina kod analiziranih modela javljaju se uglavnom u području zatvarača ili iza njega. Raspon utjecaja pojedine fizikalne veličine ovisi o ulaznim parametrima, geometriji modela i rubnim uvjetima. Obavljene su usporedbe maksimalnih vrijednosti pojedinih fizikalnih veličina koje se javljaju unutar cijelog modela s maksimalnim vrijednostima koje se javljaju na samom zatvaraču, te je ustanovljeno kako se maksimalne vrijednosti pojedinih fizikalnih veličina ne javljaju točno na zatvaraču, niti u njihovoj neposrednoj blizini. Primjer toga je kinetička energija turbulencije čija maksimalna vrijednost pri velikim ulaznim brzinama toka može biti odbačena daleko iza zatvarača, što ukazuje kako zadnja pretpostavka nije u potpunosti točna, te ovisi o mnogim faktorima poput ulaznih parametara, geometrije i promatrane fizikalne veličine. Kod leptirastih zatvarača je na temelju usporedbe masenih protoka po objema protočnim površinama modela utvrđen odnos protoka za sva 3 stupnja otvorenosti. Uvid u masene protoke po protočnim površinama nam pruža informaciju o tome kolika količina vode prođe s pojedine strane zatvarača, što nije moguće precizno pretpostaviti. Odnos masenih protoka također pruža uvid o tome gdje bi se na pojedinom modelu mogle pojaviti veće vrijednosti fizikalnih veličina.

Analizirani modeli su jednostavne geometrije, pa je približno pretpostavljanje rezultata bilo djelomično moguće i prije provedene analize. Korištene geometrije modela samo su jedne od vrsta pločastih i leptirastih modela. Ovim je radom dokazano kako je provedba hidrauličkih analiza moguća za razne oblike geometrije i razne zatvarače, od jednostavnih do kompleksnijih geometrija s svim detaljima. Rad može služiti kao podloga za daljnja

istraživanja, npr. ostali stupnjevi otvorenosti kojima se upotpunjuje simulacija vrijednosti i poznavanje modela. Pravilnim i detaljnim numeričkim modeliranjem i razvojem numeričkog modela i njegovih podmodela nastaje mogućnost korištenja dobivenih rezultata za poboljšanje svojstava zatvarača pri njihovoj izradi i slično. Primjena računalnog modeliranja unutar područja Mehanike fluida omogućuje napredak i poboljšanje (u ovom slučaju dimenzioniranja zatvarača) i povećava mogućnosti novih postignuća potpomognutih razvojem tehnologije.

7. LITERATURA

- [1] Science direct, <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/gate-valve>, (preuzeto dana 23.8.2019.)
- [2] Hard Hat Engineer, <https://hardhatengineer.com/gate-valve-types-parts/>, (preuzeto dana 23.8.2019.)
- [3] Avk Valves, <https://www.avkvalves.eu/en/insights/product-insights/gate-valves/what-is-a-gate-valve>, (preuzeto dana 24.8.2019.)
- [4] Stojić, P., Hidrotehničke građevine, knjiga II. Građevinsko-arhitektonski fakultet Sveučilišta u Splitu, Split, 1998.
- [5] Quora, <https://www.quora.com/What-is-the-working-principle-of-the-gate-valve>, (preuzeto dana 24.8.2019.)
- [6] Valvo Tubi, <https://www.valvotubi.com/prodotto/fig-93-soft-seated-gate-valves-inductile-iron-pn-10-and-16/>, (preuzeto dana 25.8.2019.)
- [7] Lockout safety, <https://www.lockoutsafety.com/news-promotion/comparison-of-gate-ball-and-butterfly-valves>, (preuzeto dana 25.8.2019.)
- [8] Hard Hat Engineer, <https://hardhatengineer.com/butterfly-valve-wafer-lug-double-triple-offset/>, (preuzeto dana 25.8.2019.)
- [9] Automation Forum, <https://automationforum.in/t/control-valve-leakage-protection-part-2-for-butterfly-valve-globe-valve-gate-valve/4456>, (preuzeto dana 25.8.2019.)
- [10] Process Industry forum, <https://www.processindustryforum.com/article/advantages-components-application-butterfly-valves>, (preuzeto dana 25.8.2019.)
- [11] China valve factory, www.china-valvefactory.com/article_the-biggest-butterfly-valve-export-italy_450.html, (preuzeto dana 25.8.2019.)
- [12] Utah State University Research, <https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2454&context=etd>, (preuzeto dana 25.8.2019.)
- [13] Project materials, <https://blog.projectmaterials.com/wp-content/uploads/2017/09/butterfly-valve-working-principle.png>, (preuzeto dana 25.8.2019.)
- [14] Tameson web shop, <https://tameson.com/butterfly-valve.html>, (preuzeto dana 25.8.2019.)
- [15] India manufacturers suppliers, <https://www.indiamart.com/proddetail/butt-weld-butterfly-valve-20459649733.html>, (preuzeto dana 26.8.2019.)
- [16] Valvo Tubi, <https://www.valvotubi.com/prodotto/fig-40008-ansi-wafer-butterfly-valves-class-150/>, (preuzeto dana 26.8.2019.)
- [17] Wikiwand, https://www.wikiwand.com/hr/Venturijeva_cijev, (preuzeto dana 26.8.2019.)
- [18] Raus, H.: Tehnička hidraulika, 6. Poglavlje: Hidrometrija, Građevinska knjiga Beograd, Beograd, 1969.

- [19] Automation forum, <https://automationforum.in/t/how-pitot-tube-is-used-in-flow-measurement/2759>, (preuzeto dana 26.8.2019.)
- [20] Amazon shop, <https://www.amazon.com/Amprobe-Hotwire-Anemometer/dp/B00U2F7U92>, (preuzeto dana 26.8.2019.)
- [21] Missouri University of Science and Technology, https://web.mst.edu/~cottrell/ME240/Resources/Fluid_Flow/Fluid_flow.pdf, (preuzeto dana 26.8.2019.)
- [22] Test and Measurement Instruments, <https://www.instrumart.com/products/43081/blancett-b1500-turbine-flow-meter>, (preuzeto dana 26.8.2019.)
- [23] Kurtanjek, Ž.: Skripta iz predmeta Mjerenje i vođenje procesa, 14. Poglavlje: Mjerenje porotoka, Prehrambeno-Biotehnološki fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2001.
- [24] E- Courses online, <http://ecoursesonline.iasri.res.in/mod/resource/view.php?id=147050>, (preuzeto dana 27.8.2019.)
- [25] Flow meters and level sensors, <https://srsintldirect.com/product/electromagnetic-flow-meter>, (preuzeto dana 27.8.2019.)
- [26] RsHydro, <https://www.rshydro.co.uk/flow-meters/ultrasonic-flow-meters/clamp-on-flow-meters/panametrics-df868-mcerts-liquid-flowmeter>, (preuzeto dana 27.8.2019.)
- [27] Bronkhorst Mass flow meters and Controllers, <https://www.bronkhorst.com/int/service-support/technologies/coriolis-mass-flow-measuring-principle/>, (preuzeto dana 27.8.2019.)
- [28] Avk valves, http://www.avk.rs/~media/files/avk002_international/certificates-and-technical-appendix/technical-information/avk-gate-valves_ta.ashx, (preuzeto dana 27.8.2019.)
- [29] Youtube, <https://www.youtube.com/watch?v=roiyfTIqOWo>, (preuzeto dana 29.8.2019.)
- [30] Ansys Fluent and CFX programe, www.ansys.com (preuzeto dana 12.8.2019.)
- [31] Wikipedia, en.wikipedia.org/wiki/Ansys, (preuzeto dana 12.8.2019.)
- [32] Ansys facebook, www.facebook.com/pg/ANSYSinc/about, (preuzeto dana 12.8.2019.)
- [33] Žic, E.: Materijali sa 3. ljetne škole pod nazivom „3rd Summer School of Computational Fluid Dynamics, CFD“, Fakultet tehničkih nauka, Sveučilište u Novom Sadu, Novi Sad, 5-10.7.2019.
- [34] Glassdoor galerija, <https://www.glassdoor.ca/Photos/ANSYS-Office-Photos-IMG3498391.htm>, (preuzeto dana 13.8.2019.)
- [35] Ansys student community, studentcommunity.ansys.com, (preuzeto dana 13.8.2019.)
- [36] Osobna web stranica nepoznatog autora, <http://2k9m.yolasite.com/gambit-nd-fluent.php> (preuzeto dana 13.08.2019.)
- [37] Wikiversity, https://en.wikiversity.org/wiki/Introduction_to_Preprocessing, (preuzeto dana 29.5.2019.)

- [38] Innomet direktoriji, http://innomet.ttu.ee/martin/mer0070/wb/wsl/ansys_classic_tutorial_lab1_.pdf, (preuzeto dana 29.5.2019.)
- [39] Researchgate, https://www.researchgate.net/publication/231890191_Compressibility_Effects_and_Turbulence_Scalings_in_Supersonic_Channel_Flow, (preuzeto dana 4.6.2019.)
- [40] Hal open archive, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00768757/document>, (preuzeto dana 5.6.2019.)
- [41] Simscale, <https://www.simscale.com/blog/2017/12/turbulence-cfd-analysis/>, (preuzeto dana 2.6.2019.)
- [42] Engineered Software Inc., Understanding the Distinction Between Total, Static and Dynamic Pressure, <https://eng-software.com/about-us/press/articles/understanding-the-distinction-between-total-static-and-dynamic-pressure/>, (preuzeto 13.07.2019.)
- [43] Rheosense blog, <https://blog.rheosense.com/what-are-the-differences-between-dynamic-and-kinematic-viscosities>, (preuzeto 18.07.2019.)
- [44] Wikipedia, <https://hr.wikipedia.org/wiki/Viskoznost>, (preuzeto 19.07.2019.)
- [45] American Meteorological society, http://glossary.ametsoc.org/wiki/Eddy_viscosity, (preuzeto 19.07.2019.)
- [46] Wikipedia, https://en.wikipedia.org/wiki/Turbulence_kinetic_energy, (preuzeto 20.07.2019.)
- [47] CFD Online Forums, <https://www.cfd-online.com/Forums/>, (preuzeto 28.07.2019.)