

Mjerenje protoka fluida cjevovodnom sustavu

Ivaničić, Dorian

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:812650>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-14**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET

Sveučilišni prijediplomski studij strojarstva

Završni rad

MJERENJE PROTOKA FLUIDA CJEVOVODNOM SUSTAVU

Mentor: prof. dr. sc. Lado Kranjčević

Rijeka, rujan 2023.

Dorian Ivaničić

0069086598

Rijeka, 16. ožujka 2022.

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

ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Dorian Ivaničić (0069086598)**
Studij: **Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva**

Zadatak: **Mjerenje protoka fluida cjevovodnom sustavu / Pipeline System Fluid Flow Measurement**

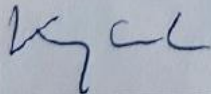
Opis zadatka:

Opisati tehnologiju mjerenja protoka fluida u cijevima. Postaviti eksperiment mjerenja protoka s ultrazvučnim mjerjačem protoka te s dodatnim kontrolnim mjernim uređajima sustava. Upotrebom računalnog modela postaviti digitalni model sustava koji se mjeri koji uključuje i sve hidrauličke elemente. Koristiti komercijalni softver ili softver otvorenog koda. Statistički komparirati i validirati rezultate mjerenja za zadani raspon protoka.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

Zadatak uručen pristupniku: 21. ožujka 2022.

Mentor:



Prof. dr. sc. Lado Kranjčević

Dorian Ivaničić

Predsjednik povjerenstva za
završni ispit:



Prof. dr. sc. Kristian Lenić

IZJAVA

Izjavljujem da sam prema članku 7. Pravilnika o završnom radu, završnom ispitu i završetku studija prijediplomskog sveučilišnog studija Tehničkog fakulteta u Rijeci, samostalno izradio završni rad pod naslovom „Mjerenje protoka fluida cjevovodnom sustavu“ pod vodstvom prof. dr. sc. Lade Kranjčevića.

Rijeka, rujan 2023.

Dorian Ivaničić

0069086598

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Ladi Kranjčeviću na mentorstvu i vodstvu pri izradi ovog završnog rada. Veliko hvala asistentici Marti Alvir koja je uvijek bila na raspolaganju pri pomoći oko izvršavanja eksperimentalnog dijela završnog rada.

SADRŽAJ

| | |
|--|----|
| 1. UVOD | 1 |
| 2. MEHANIKA FLUIDA | 2 |
| 2.1. Važnost mjerenja protoka fluida..... | 2 |
| 3. STRUJANJE FLUIDA..... | 4 |
| 3.1. Vrste strujanja fluida | 4 |
| 3.1.1. Reynoldsov broj | 4 |
| 3.1.2. Laminarno strujanje..... | 5 |
| 3.1.3. Turbulentno strujanje | 6 |
| 3.1.4. Prijelazno strujanje | 7 |
| 3.2. Gubici pri strujanju u cjevovodu | 9 |
| 3.2.1. Duljinski gubici | 9 |
| 3.2.2. Lokalni gubici | 12 |
| 3.3. Protok..... | 13 |
| 3.3.1. Volumetrijski protok | 14 |
| 3.3.2. Maseni protok..... | 14 |
| 4. UREĐAJI ZA MJERENJE PROTOKA FLUIDA..... | 15 |
| 4.1. Mehanički protokomjeri | 15 |
| 4.1.1. Protokomjer s ovalnim zupčanicima | 15 |
| 4.1.2. Turbinski protokomjer..... | 17 |
| 4.2. Tlačni protokomjeri | 18 |
| 4.2.1. Mjerna prigušnica..... | 18 |
| 4.2.2. Venturimetar..... | 19 |
| 4.3. Maseni protokomjeri..... | 20 |
| 4.3.1. Coriolisov protokomjer | 20 |
| 4.3.2. Termodinamički protokomjer | 21 |

| | | |
|--------|---|----|
| 4.4. | Elektronički protokomjeri..... | 22 |
| 4.4.1. | Elektromagnetski protokomjer..... | 22 |
| 5. | ULTRAZVUČNI PROTOKOMJERI..... | 23 |
| 5.1. | Ultrazvučni protokomjer vremena prolaza..... | 24 |
| 5.2. | Ultrazvučni protokomjeri frekvencijskog pomaka (Dopplerovi protokomjeri)..... | 25 |
| 5.3. | Ultrazvučni protokomjer FDT-21..... | 26 |
| 6. | AFT FATHOM..... | 28 |
| 7. | LABORATORIJSKO MJERENJE PROTOKA..... | 29 |
| 7.1. | Priprema i instalacija ultrazvučnog protokomjera..... | 30 |
| 7.2. | Rezultati mjerenja protoka..... | 32 |
| 8. | RAČUNALNA SIMULACIJA CJEVOVODNOG SUSTAVA..... | 34 |
| 9. | ZAKLJUČAK..... | 38 |
| 10. | LITERATURA..... | 39 |
| | SAŽETAK..... | 43 |
| | ABSTRACT..... | 44 |

1. UVOD

Mehanika fluida proučava kako se fluidi, koji uključuju tekućine i plinove, ponašaju i djeluju sa svojim okruženjem. Njezine primjene obuhvaćaju različita područja, obuhvaćajući sve od razumijevanja atmosferskih i oceanskih fenomena do optimiziranja dizajna zrakoplova, brodova i cjevovoda.

Cilj ovog rada jest postaviti eksperiment mjerenja protoka s ultrazvučnim protokomjerom i kontrolnim mjernim uređajima te međusobno usporediti dobivene vrijednosti protoka, kao i postaviti digitalni model cjevovodnog sustava kako bi se izvršila simulacija istog. Model korištenog ultrazvučnog protokomjera je FDT-21, dok je programski paket korišten za računalnu simulaciju AFT Fathom. U drugom poglavlju iznesene su osnovne informacije o mehanici fluida i važnosti mjerenja protoka fluida. U trećem je poglavlju opisano strujanje, nabrojene su njegove vrste i detaljnije su opisane iste, zatim su objašnjeni gubici u cjevovodu te navedene i objašnjene vrste gubitaka te su na kraju opisane dvije vrste protoka. U četvrtom poglavlju opisani su neki od uređaja za mjerenje protoka fluida koji su radi preglednosti razvrstani prema načinu mjerenja. U narednom poglavlju detaljnije su opisane karakteristike, način rada i vrste ultrazvučnog protokomjera te je opisan korišteni protokomjer. U šestom poglavlju nešto više je rečeno o korištenom softveru i njegovim mogućnostima. U sljedećem je poglavlju opisan je postupak postavljanja laboratorijskog mjerenja protoka te rezultati istog. U zadnjem je poglavlju opisano provođenje računalne simulacije te su izneseni rezultati navedenog i prikazane neke od dodatnih mogućnosti korištenog softvera.

2. MEHANIKA FLUIDA

Mehanika fluida ili hidromehanika je grana fizike koja proučava zakone ravnoteže i strujanja fluida [1], odnosno kapljevina i plinova koji se deformiraju pri proizvoljno malenom tangencijalnom naprezanju. Dvije su temeljne grane mehanike fluida: statika fluida, grana hidromehanike koja se bavi pojavama i silama u fluidima koje miruju [2] te dinamika fluida, grana koja se bavi zakonima strujanja fluida i pojavama uzrokovanim uzajamnim djelovanjem struje fluida i tijela koje graniči s fluidom u gibanju [3]. Zbog činjenice da su fluidi sveprisutni u prirodi, mehanika fluida ima široku primjenu u strojarstvu, zrakoplovstvu, civilnom, kemijskom, biomedicinskom inženjerstvu, biologiji, meteorologiji, astronomiji i brojnim drugim područjima. Neke od praktičnih primjena hidromehanike su: dizajn lopatica turbina za efikasnu pretvorbu energije vode ili vjetra u električnu energiju, projektiranje i optimiziranje izmjenjivača topline za što bolji prijenos topline između dva fluida ili projektiranje umjetnih organa poput umjetnog srca u biomedicinskom inženjerstvu. Važno je naglasiti da je u novije doba, zbog kompleksnosti prirode područja, tj. potrebe za rješavanjem sve zahtjevnijih jednadžbi, računalna dinamika fluida od iznimne važnosti za daljnje razumijevanje mehanike fluida i napredak u ostvarivanju boljih rješenja, odnosno projektiranju boljih i efikasnijih modela, elemenata i proizvoda. [4]

2.1. Važnost mjerenja protoka fluida

U mehanici fluida, protok je jedna od temeljnih fizikalnih veličina i njegovo mjerenje ima značajnu ulogu u naftnoj, kemijskoj, prehrambenoj (Slika 2.1.) i drugim industrijama, kao i u vodoopskrbi, klimatizaciji, rudarstvu i sl. Precizno mjerenje protoka pomoću odgovarajućeg mjerača protoka važno je za osiguravanje glatkog, sigurnog i efikasnog odvijanja procesa. Kontrolom protoka, koja se ostvaruje preciznim mjerenjem, postiže se niz prednosti: optimizacija procesa, smanjenje otpada, ušteda energije te bolja kontrola nad potrošnjom iste, kvalitetniji proizvod, itd. Nadalje, u mnogim industrijskim procesima precizno mjerenje protoka je neophodno kako bi se osigurala usklađenost s ekološkim i sigurnosnim propisima. Sve prethodno navedene prednosti kvalitetnog mjerenja protoka fluida, proces, a time i proizvod, čine konkurentnijim na tržištu, čime je ulaganje u kvalitetne mjerače protoka opravdano. [5]



Slika 2.1. Mjerač protoka u prehrambenoj industriji (preuzeto sa [25])

3. STRUJANJE FLUIDA

Od zraka koji udišemo do vode koju pijemo, sve oko nas je neprestano u pokretu, dok tekućine teku i cirkuliraju kroz prirodne i projektirane sustave. U mehanici fluida, strujanje je gibanje fluida koje se može odvijati unutar neke cijevi ili korita, oko nepomičnoga predmeta ili oko predmeta koji se giba u fluidu. [6] Primjere strujanja fluida u kontekstu mehanike fluida mogu se pronaći u širokom rasponu sustava: od cijevi i pumpi do turbina i krila zrakoplova. Razumijevanje strujanja fluida bitno je za projektiranje i optimizaciju sustava te predviđanje i ublažavanje potencijalnih problema, kao što su turbulencije i padovi tlaka.

3.1. Vrste strujanja fluida

Postoje dvije osnovne vrste strujanja fluida: laminarno i turbulentno strujanje. Na prijelazu iz laminarnog u turbulentno strujanje, ili rjeđe obrnuto, javlja se prijelazno strujanje.

3.1.1. Reynoldsov broj

Reynoldsov broj (R_e) koristi se za određivanje je li strujanje tekućine laminarno, turbulentno ili prijelazno. R_e je jedan od glavnih kontrolnih parametara u svim strujanjima i ima ključnu ulogu u razumijevanju ponašanja strujanja fluida. Vrijednost tog bezdimenzijskog broja ovisi o omjeru inercijskih i viskoznih sila. Što je vrijednost broja manji, to je strujanje manje turbulentno. Vrijednost Reynoldsovog broja može se odrediti izrazom (3.1):

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

gdje je:

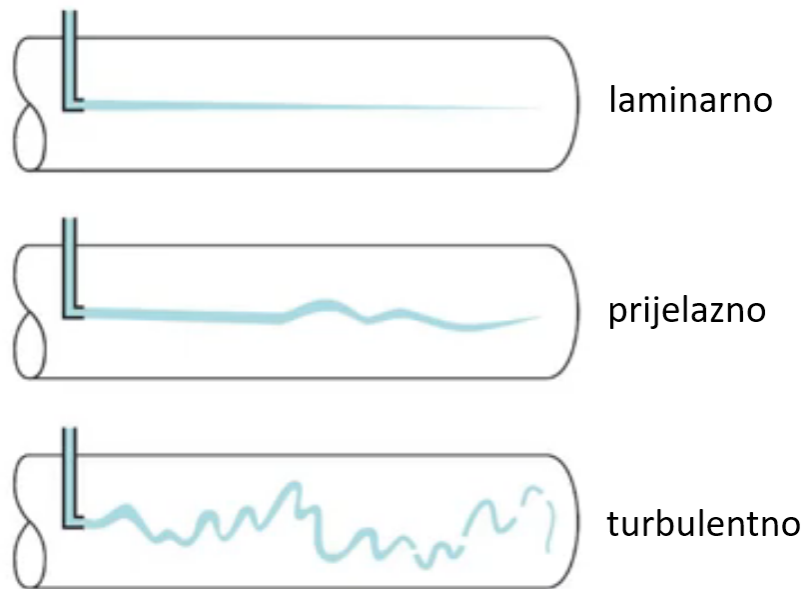
v – karakteristična brzina strujanja [m/s],

D – promjer cijevi ili druge karakteristične dužine [m],

ν – kinematički viskozitet [m^2/s].

Pri vrijednostima $R_e \leq 2300$ strujanje je laminarno, pri $R_e > 4000$ strujanje postaje turbulentno, dok

se unutar vrijednosti $2300 < R_e \leq 4000$ strujanje smatra prijelaznim. Nabrojene vrste strujanja grafički su prikazane na Slici 3.1. [7]



Slika 3.1. Različite vrste strujanja (modificirano prema [26])

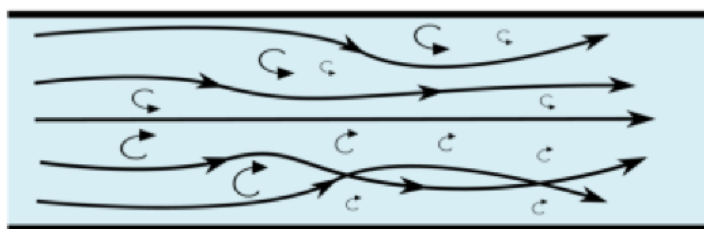
3.1.2. Laminarno strujanje

Laminarno strujanje nastaje kada se fluid glatko kreće u paralelnim slojevima, bez miješanja među slojevima. Čestice fluida se gibaju u ravnim linijama paralelno sa stijenkom (Slika 3.2.). Da bi fluid strujao paralelno, njegova brzina mora biti mala i viskoznost fluida mora dominirati nad inercijskim silama. Laminarno strujanje vrlo je povoljno u mehanici fluida jer se gibanje pojedinih čestica može točno predvidjeti korištenjem matematičkih jednadžbi i modela. Primjer laminarnog strujanja je mirno strujanje plitke vode preko glatke barijere ili kontrolirani mlaz vode iz vodenog balona (Slika 3.3.). [8, 9]

laminarno strujanje



turbulentno strujanje



Slika 3.2. Smjerovi strujnica kod laminarnog i turbulentnog strujanja (modificirano prema [8])



Slika 3.3. Laminarno strujanje (preuzeto sa [27])

3.1.3. Turbulentno strujanje

Nasuprot laminarnom strujanju, turbulentno strujanje karakteriziraju kaotični, nepravilni uzorci, s miješanjem i vrtloženjem fluida, kao i učestalim promjenama tlaka i smjera protoka (Slika 3.2.). Turbulentno strujanje javlja se pri većim brzinama fluida i prilikom jačanja inercijskih sila u

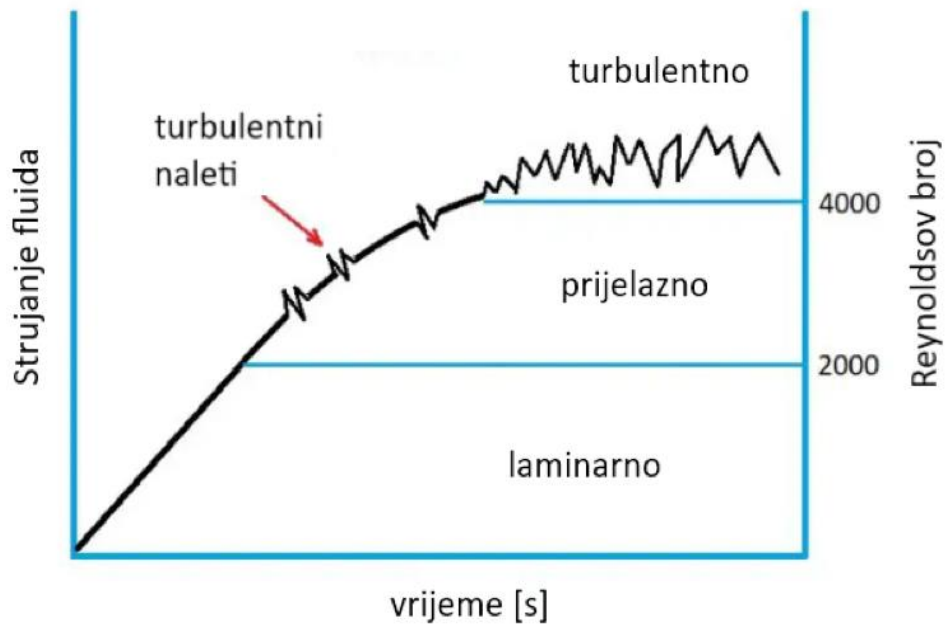
odnosu na viskoznost fluida. Kod ovog je strujanja karakterističan i velik gubitak energije pri gibanju zbog čestih promjena smjerova, padova tlaka i vrtloženja. Turbulentno je strujanje daleko zastupljenije od laminarnog, zbog niza uvjeta koji moraju biti zadovoljeni da bi strujanje bilo laminarno. Neki od primjera su vjetrovi, morske struje, strujanje fluida u rijekama, cjevovodima, strujanje zraka oko automobila (Slika 3.4.), zrakoplova, itd. [8, 10]



Slika 3.4. Turbulentno strujanje zraka oko automobila (preuzeto sa [28])

3.1.4. Prijelazno strujanje

Premda se strujanje klasificira kao laminarno ili turbulentno, na prijelazu iz jedne vrste strujanja u drugo razlikujemo i prijelazno strujanje (Slika 3.5.). Kod ove vrste strujanja javljaju se karakteristike laminarnog i turbulentnog strujanja. Primjerice, kod fluida u mirovanju u cjevovodu, Re iznosi 0. Zatim fluid kreće strujati laminarno sve dok inercijske sile ne nadvladaju viskozne u toj mjeri da se svako malo pojave turbulentni naleti. Vrijednost Re je tada premašila 2300. Daljnjim povećavanjem brzine, fluid će strujati sve više turbulentno, sa sve manje karakteristika laminarnog strujanja. Konačno, nakon što je Re prešao 4000, strujanje je u potpunosti turbulentno. Još neki od primjera prijelaznog strujanja su dim svijeće (Slika 3.6.) i cigarete, gdje se jasno vidi postepeni prelazak laminarnog u turbulentno strujanje. [11]



Slika 3.5. Dijagram ovisnosti Reynoldsovog broja, te posljedično vrste strujanja, o vremenu prilikom strujanja fluida u cjevovodu (modificirano prema [11])



Slika 3.6. Dim svijeće (preuzeto sa [29])

3.2. Gubici pri strujanju u cjevovodu

Kod strujanja fluida u cjevovodima, gubici igraju ključnu ulogu u određivanju učinkovitosti i iskoristivosti cjevovodnih sustava. Ti se gubici očituju u rasipanju energije u obliku pada tlaka te posljedično, smanjenju brzine strujanja (kinetičke energije) i gubitku snage kod sustava koji uključuju pumpe ili turbine. Javljaju se zbog raznih čimbenika, poput nesavršenosti geometrije stijenke cijevi, turbulencije, trenja između fluida i cijevi, promjene površine ili oblika poprečnog presjeka cijevi, itd. Razumijevanje i kvantificiranje tih gubitaka ključni su za projektiranje, analizu i optimizaciju cjevovodnih sustava.

Gubici pri strujanju u cijevi h_g dijele se na duljinske h_{duz} i lokalne h_{lok} . Vrijedi izraz (3.2):

$$h_g = h_{duz} + h_{lok} \quad (3.2)$$

3.2.1. Duljinski gubici

Duljinski ili glavni gubici su gubici koji nastaju zbog trenja između stijenke cijevi i fluida te su proporcionalni duljini cijevi, približno proporcionalni kvadratu brzine, obrnuto proporcionalni unutarnjem dijametru cijevi; ovise o površinskoj hrapavosti unutarnje stijenke cijevi, o gustoći i viskoznosti fluida i neovisni su o tlaku.

Ovisno o vrsti strujanja, gubici se različito računaju. Kod laminarnog strujanja u horizontalnoj cijevi pad tlaka Δp ovisan je o srednjoj brzini strujanja, duljini cijevi, promjeru cijevi i viskoznosti fluida. Ne ulazeći u detalje izvođenja, eksperimentalno se dolazi do izraza (3.3) za pad tlaka:

$$\Delta p = \lambda \frac{L}{D} \frac{\rho v^2}{2} \quad (3.3)$$

gdje je:

λ – koeficijent trenja ili Darcyjev koeficijent trenja [-],

L – duljina cijevi [m],

D – promjer cijevi [m],

ρ – gustoća fluida [kg/m³],

v – srednja brzina strujanja [m/s].

Uobičajeno je gubitke izražavati piezometričnom visinom h . Piezometrična se visina odnosi na potencijalnu energiju po jedinici težine stupca tekućine u određenoj točki u sustavu tekućine, mjerenu u jedinicama duljine (metrima). Piezometrična visina predstavlja onu visinu do koje bi se tekućina popela u piezometru spojenom na tu točku. Piezometar je uređaj koji se koristi za mjerenje tlaka tekućine. Ukoliko se pad tlaka Δp izrazi gubitkom piezometrične visine h , na način da se pad tlaka zamijeni izrazom ρgh , dobiva se Darcy-Weisbachova jednadžba (3.4):

$$h_{\text{duz}} = \lambda \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (3.4)$$

gdje je:

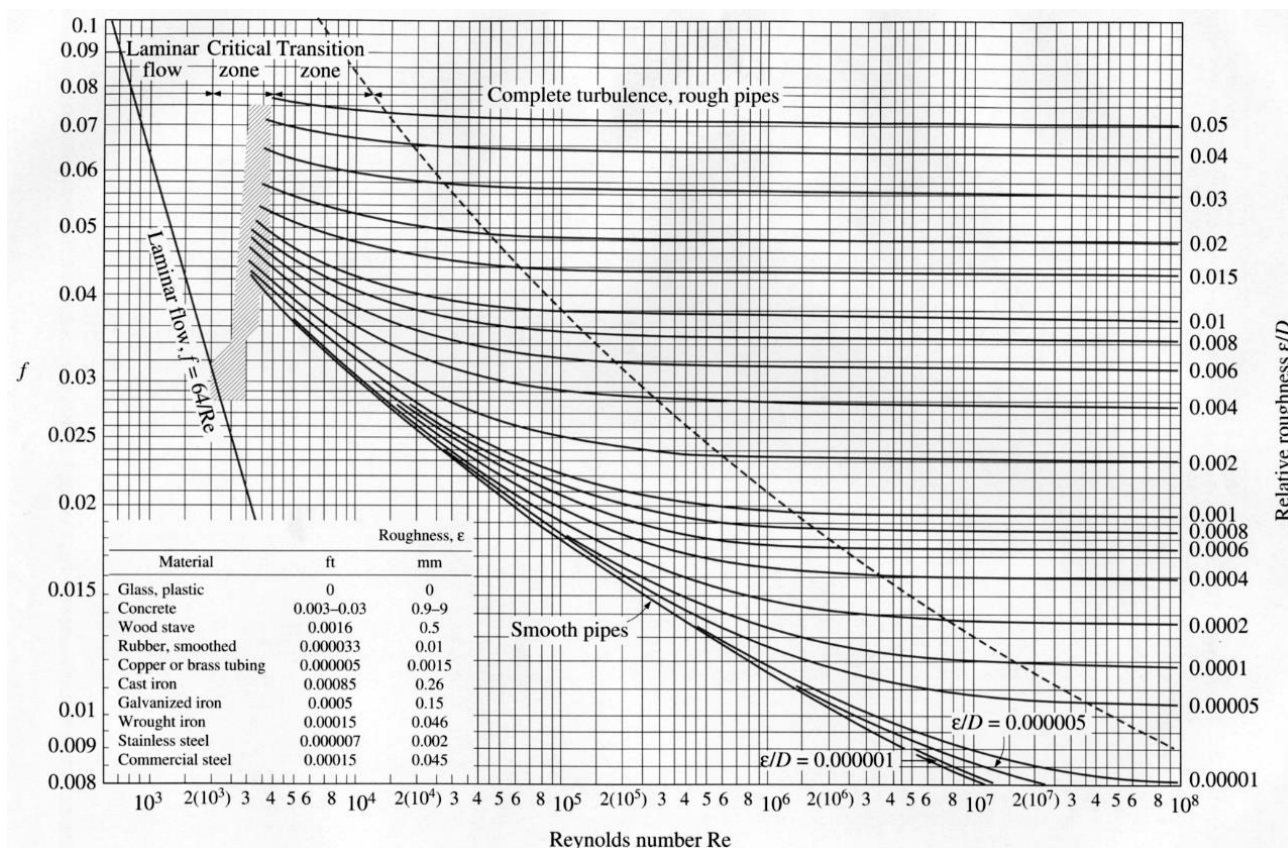
g – ubrzanje Zemljine sile teže [m/s^2].

Darcy-Weisbachova jednadžba koristi se za izračun dužinskih gubitaka u cijevi kružnog poprečnog presjeka. Kod ostalih oblika presjeka (npr. pravokutnog), prije uvrštavanja u jednadžbu potrebno je izračunati vrijednost hidrauličnog radijusa R_h te se u jednadžbu zatim uvrštava odgovarajući promjer. Kod laminarnog strujanja, Darcyjev koeficijent trenja ovisi samo o Reynoldsovom broju. Računa ga se izrazom (3.5):

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (3.5)$$

Izračun gubitaka kod turbulentnog strujanja nešto je kompleksniji zbog većeg broja parametara o kojima je pad tlaka ovisan. Osim o maloprije navedenim parametrima o kojima je pad tlaka ovisan kod laminarnog strujanja, kod turbulentnog tu su još hrapavost e i gustoća fluida ρ . Pad tlaka moguće je izračunati Darcy-Weisbachovom jednadžbom, međutim koeficijent trenja više ne ovisi samo o Reynoldsovom broju, nego i kvaliteti cjevovoda e/D (relativna hrapavost) te ga se stoga ne može izračunati izrazom 3.5.

Jedan od načina određivanja koeficijenta trenja je korištenje Moodyjevog dijagrama (Slika 3.7.) u kojem su prikazane ovisnosti koeficijenta trenja o Reynoldsovom broju Re i relativnoj hrapavosti e/D . Drugi je način korištenje empirijskih izraza koji modeliraju Moodyjev dijagram.



Slika 3.7. Moodyjev dijagram (preuzeto sa [30])

Jedan od najčešće korištenih izraza je približna Colebrookova formula (3.6):

$$\lambda = \frac{1,325}{\left[\ln \left(\frac{e}{3,7 \cdot D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (3.6)$$

gdje je:

e – visina neravnina stijenke cijevi [m],

D – promjer cijevi [m].

Formula aproksimira nepraktičnu Colebrookovu formulu implicitnog oblika uz približnu grešku od 1 %.

Važno je napomenuti kako su u Moodyjevom dijagramu i empirijskim izrazima vrijednosti koeficijenta trenja dane za nove cijevi. Dužom se uporabom cijevi, zbog korozije i naslaga, hrapavost može povećati ili se unutarnji presjek može smanjiti, što izrazito utječe na vrijednost Darcyjevog koeficijenta trenja. [12]

3.2.2. Lokalni gubici

Gubici koji nastaju zbog separacije (odvajanja) struje od stijenke cijevi i stvaranja „mrtvih zona“ u kojima se fluid vrtloži i crpi energiju iz glavne struje nazivaju se lokalni gubici. Mogu se podijeliti na:

- lokalne gubitke uslijed promjene presjeka struje fluida, npr. naglo proširenje/suženje, ulazna ušća, ulazni i izlazni otvori, prigušnice, sapnice, difuzor (postupno proširenje), konfuzor (postupno suženje), Venturijeva cijev, ventili, slavine, zasuni, itd.
- lokalne gubitke uslijed promjene smjera struje fluida, npr. nagla promjena smjera kod koljena, blaga promjena smjera kod cijevnih lukova

Postoje i lokalni otpori koji objedinjuju obje grupe i nastaju zbog promjene smjera i presjeka (račve, bifurkacije, sastavci i sl.). [12]

Općeniti izraz kojim se računaju lokalni gubici glasi (3.7):

$$h_{\text{lok}} = k \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (3.7)$$

gdje je:

k – koeficijent lokalnog gubitka (određuje se eksperimentalno) [-]

ili izraženo preko protoka (3.8):

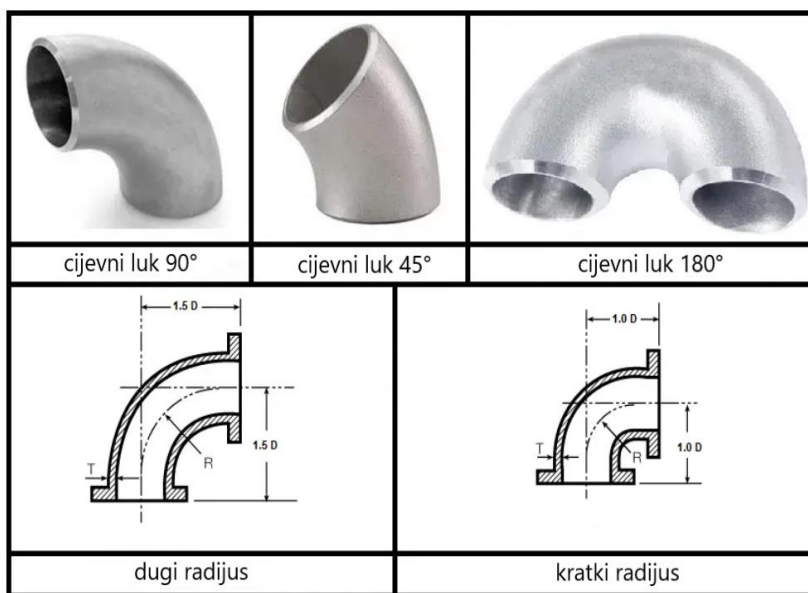
$$h_{\text{lok}} = k \frac{8 \cdot Q^2}{D^4 \cdot g \cdot \pi^2} \quad (3.8)$$

Kod cijevnih lukova, koeficijent lokalnog gubitka predstavlja gubitak energije u usporedbi s ravnim dijelom cijevi, nastao zbog nagle promjene smjera strujanja fluida, što rezultira povećanim trenjem i turbulencijama te promjene količine gibanja. Vrijednost koeficijenta ovisi o geometriji cijevnog luka (kutu skretanja i polumjeru zakrivljenosti cijevi). Od navedenog, kut skretanja u najvećoj mjeri utječe na vrijednost koeficijenta. Kod većih polumjera zakrivljenosti, vrijednost se koeficijenta smanjuje. U Tablici 3.1. prikazane su vrijednosti koeficijenta k za cijevne lukove različitih kutova skretanja, oblika presjeka te omjera polumjera zakrivljenosti i promjera cijevi.

Tablica 3.1. Vrijednosti koeficijenta k za različite varijante cijevnih lukova (modificirano prema [31])

| Vrsta | Omjer polumjera zakrivljenosti i promjera cijevi | k |
|--------------------------------------|--|------|
| cijevni luk 45° | 1 | 0,35 |
| | 1,5 | 0,2 |
| cijevni luk 90° (okrugli presjek) | 1 | 0,75 |
| | 1,5 | 0,45 |
| cijevni luk 90° (pravokutni presjek) | - | 1,3 |
| cijevni luk 180° | - | 1,5 |

Prikaz cijevnih lukova različitih kutova skretanja i omjera polumjera zakrivljenosti i promjera cijevi prikazani su na Slici 3.8. Cijevni luk kojemu spomenuti omjer iznosi 1 naziva se lukom kratkog radijusa, a onima kojima on iznosi 1,5, lukovi dugog radijusa. Sa stanovišta gubitaka, povoljnije je, kada je to moguće, koristiti lukove dugog radijusa.



Slika 3.8. Prikaz različitih cijevnih lukova te presjek cijevnog luka dugog, odnosno kratkog radijusa (modificirano prema [32])

3.3. Protok

Protok je fizikalna veličina koja opisuje količinu fluida koji protječe promatranim presjekom (primjerice cijevi, riječnoga korita, krvne žile) u jedinici vremena. [13] Razlikuju se volumetrijski i maseni protok.

3.3.1. Volumetrijski protok

Volumetrijski protok ili volumni protok (oznaka Q ili \dot{V}) je fizikalna veličina koja određuje obujam (volumen) fluida koji prolazi neku točku ili poprečni presjek u jedinici vremena, a određuje se prema izrazu (3.9):

$$Q = \dot{V} = \frac{\Delta V}{\Delta t} = v \cdot A \quad (3.9)$$

gdje je:

Q – volumni protok [m^3/s],

ΔV – promjena volumena fluida koji teče kroz promatrani presjek [m^3],

Δt – vremenski interval toka fluida koji teče kroz promatrani presjek [s],

v – brzina fluida [m/s],

A – površina poprečnog presjeka [m^2].

3.3.2. Maseni protok

Maseni je protok (oznaka \dot{m}) fizička veličina koja se odnosi na protok tvari u smislu njezine mase u jedinici vremena. Računa se pomoću izraza (3.10):

$$\dot{m} = \frac{\Delta m}{\Delta t} = \rho \cdot v \cdot A = \rho \cdot Q \quad (3.10)$$

gdje je:

\dot{m} – maseni protok [kg/s],

Δm – promjena mase koja struji kroz promatrani presjek [kg],

Δt – vremenski interval toka fluida kroz promatrani presjek [s].

Iz izraza 3.10 vidljivo je da se maseni protok može dobiti množenjem gustoće fluida s volumetrijskim protokom.

4. UREĐAJI ZA MJERENJE PROTOKA FLUIDA

Kroz povijest razvile su se brojne vrste uređaja za mjerenje protoka. Potreba za različitim vrstama protokomjera javlja se zbog različitih karakteristika fluida i specifičnih zahtjeva kod mjerenja protoka. Mjerači protoka moraju točno i pouzdano mjeriti protok kroz širok raspon vrsta fluida, bilo da se radi o tekućinama ili plinovima, kao i različitih fizikalnih svojstava fluida poput viskoznosti, stlačivosti i temperature. Prema načinu mjerenja protoka, razlikuju se:

- mehanički protokomjeri,
- tlačni protokomjeri,
- maseni protokomjeri,
- elektronički protokomjeri.

4.1. Mehanički protokomjeri

Mjerenje protoka fluida kod mehaničkih protokomjera vrši se pomoću pokretnih dijelova, bilo prolaskom izoliranih, tj. poznatih volumena tekućine kroz niz zupčanika ili komora (protokomjeri s pozitivnim pomakom), ili pomoću rotora.

Protokomjeri s pozitivnim pomakom volumetrijski protok mjere na način da tekućinu podijele na poznate volumene i bilježe svaki takav prolazak kroz uređaj. [14] Na temelju poznate veličine volumena i vremena potrebnog za pražnjenje, moguće je vrlo precizno odrediti protok. Primjeri takvih protokomjera su: protokomjer s ovalnim zupčanicima, klipni protokomjer i membranski protokomjer.

Mehanički protokomjeri koji ne koriste fiksne volumene za mjerenje protoka, upotrebljavaju rotirajuće komponente poput rotora. Dizajnirani su tako da strujanje fluida uzrokuje rotaciju rotora, pri čemu je brzina vrtnje direktno proporcionalna protoku. Mogu mjeriti protok tekućinama i plinovima.

4.1.1. Protokomjer s ovalnim zupčanicima

Protokomjer s ovalnim zupčanicima radi na principu pozitivnog pomaka. Sastoji se od dva zupčanika ovalnog oblika smještena unutar kućišta. Zubi zupčanika su tijekom cijele rotacije međusobno u kontaktu i ne dopuštaju prolazak tekućine između zupčanika. Rotacija zupčanika

istiskuje fiksni volumen tekućine sa svakim okretajem. Broj takvih rotacija mjeri se pomoću magnetskog ili optičkog senzora. Mjerenjem broja okretaja zupčanika i poznavanjem volumena pomaka po okretaju, protokomjer s ovalnim zupčanicima omogućuje iznimno precizno mjerenje protoka tekućine. Na Slici 4.1. prikazan je primjer protokomjera s ovalnim zupčanicima za industrijsku primjenu, dok su na Slici 4.2. prikazani zupčanici u rastavljenom kućištu.



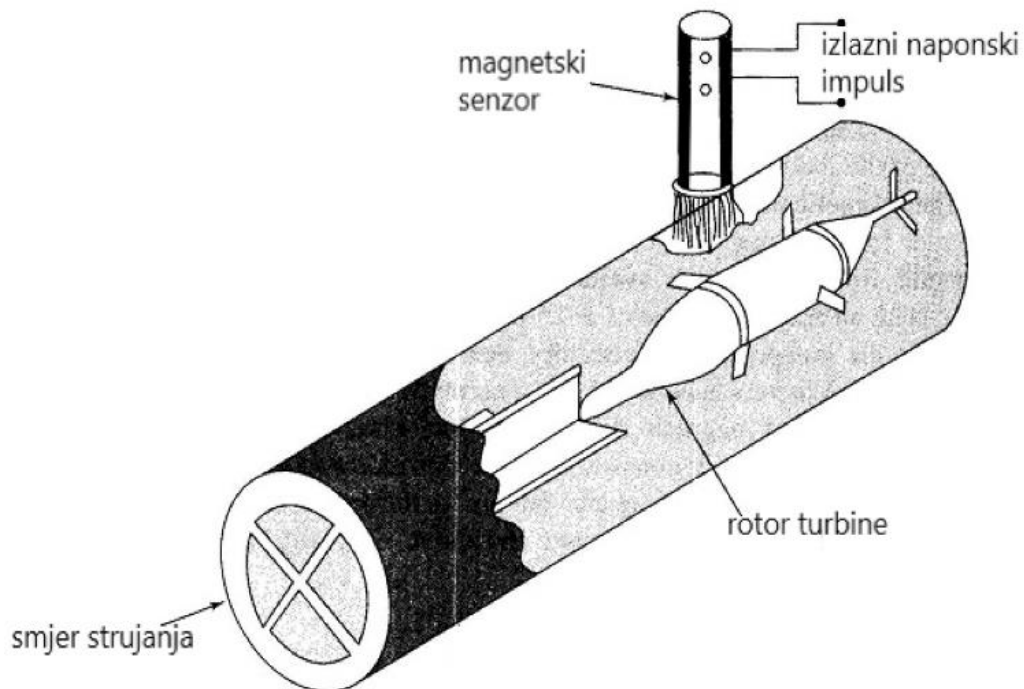
Slika 4.1. Industrijski protokomjer s ovalnim zupčanicima (preuzeto sa [33])



Slika 4.2. Položaj zupčanika unutar kućišta protokomjera s ovalnim zupčanicima (preuzeto sa [34])

4.1.2. Turbinski protokomjer

Turbinski protokomjer (Slika 4.3.) radi na principu rotacije rotora turbine izazvane protokom fluida. Kada fluid struji kroz protokomjer, udara u lopatice aksijalno postavljenog rotora, uzrokujući njegovo okretanje. Magnetski senzor iznad rotora mjeri brzinu vrtnje, potrebnu za dobivanje protoka. Neke od prednosti turbinskih protokomjera su: široki raspon mjerenja, moguće korištenje kod čistih i zaprljanih fluida, kao i širokog raspona protoka, jednostavna montaža, niski gubici u vidu pada tlaka fluida uslijed mjerenja protoka te dobra razina točnosti u odnosu na cijenu uređaja. Limitacije povezane s korištenjem su moguća pojava kavitacije, nedovoljna točnost kod vrlo viskoznih tekućina te da spajanje uređaja zahtijeva ravni dio cijevi ispred i iza cijevi, kako bi se osigurala točnost mjerenja i raspršivanje vrtloga u strujanju. Manje su točnosti u odnosu na protokomjere s pozitivnim pomakom. Poželjno je izbjegavati korištenje turbinskih protokomjera kod vrlo velikih brzina vrtnji zbog smanjene točnosti i potencijalnih oštećenja ležaja. [15]



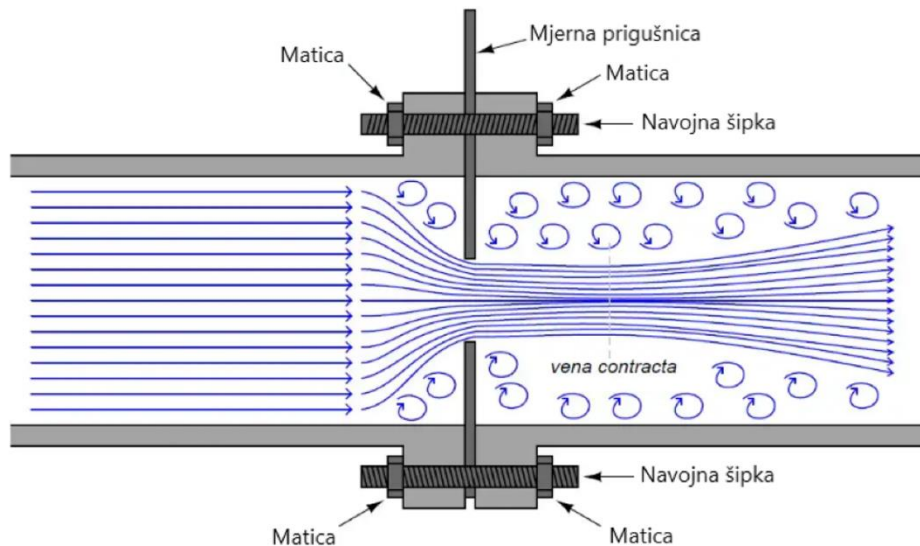
Slika 4.3. Pojednostavljeni prikaz dijelova turbinskog protokomjera (modificirano prema [35])

4.2. Tlačni protokomjeri

Mjerači protoka temeljeni na tlaku, zbog svoje jednostavnosti i lakoće korištenja, često se upotrebljavaju za mjerenje brzine protoka tekućina u različitim primjenama. Ovi mjerači rade na principu spoznaje da protok tekućine stvara pad tlaka pri strujanju kroz prepreku. Mjerenjem se ovog pada tlaka protok može lako odrediti pomoću relevantnih jednadžbi i faktora pretvorbe. Tlačnih protokomjera ima mnogo, a neki od njih su: mjerna prigušnica, venturimetar, Pitotova cijev, Dallova cijev, mjerna sapnica, V-konusni protokomjer i klinasti protokomjer.

4.2.1. Mjerna prigušnica

Mjerna je prigušnica jedna od najzastupljenijih tlačnih protokomjera zbog iznimno jednostavne izvedbe. Sastoji se od tanke ploče s precizno strojno izrađenim otvorom koji mogu biti raznih oblika i dimenzija te elemenata za pričvršćenje ploče između dvije cijevi s prirubnicom. Otvor je manji od promjera cijevi kroz koju struji fluid te dolazi do prigušenja strujanja i pada tlaka. Nizvodno od otvora mjerne prigušnice, mlaz strujanja doseže točku najmanje površine poprečnog presjeka. Ta se regija naziva *vena contracta* (lat. *vena contracta*, skupljena vena), područje najmanjeg tlaka i najveće brzine fluida. Protok se može odrediti preko Bernoullijeve jednadžbe na temelju razlike u tlaku fluida prije i nakon prigušenja i koeficijentima utvrđenim istraživanjima. Na Slici 4.4. ilustrirano je strujanje fluida kroz mjernu prigušnicu. [16, 17]



Slika 4.4. Strujanje fluida kroz mjernu prigušnicu (modificirano prema: [17])

4.2.2. Venturimetar

Venturimetar mjeri protok na principu pada tlaka fluida prilikom strujanja kroz suženi presjek Venturijeve cijevi. Taj se efekt naziva Venturijevim efektom. Venturijeva cijev je konstruirana tako da ulazni dio cijevi odgovara promjeru cijevi kroz koju fluid struji, nakon čega slijedi suženje cijevi pod kutom od $\approx 20^\circ$. Fluid u ovom području postepeno ubrzava. Cijev je najuža u grlu, gdje fluid ima najveću brzinu i najmanji tlak. Slijedi postupno proširenje cijevi po kutom od 5° , gdje se brzina fluida polako vraća na početnu. Na ulazu i u grlu predviđeni su otvori za montažu diferencijalnog manometra za mjerenje razlike tlakova. Opisana konstrukcija venturimetra prikazana je na Slici 4.5.

Venturimetar se može koristiti za mjerenje protoka plinova i tekućina, pri čemu je osim razlike tlakova, kod plinova potrebno mjeriti i temperaturu. Neke od prednosti su mogućnost mjerenja protoka u cijevima vrlo velikog promjera, zaprljanih tekućina, nizak pad tlaka od oko 10 % te postavljanje venturimetra može biti horizontalno, vertikalno ili pod kutom. Nedostaci su visoka cijena uređaja zbog zahtjevnosti izrade, nužna instalacija na ravnom dijelu cjevovoda, skupo održavanje i velike dimenzije uređaja. [18]



Slika 4.5. Konstrukcija venturimetra (bez diferencijalnog manometra) (preuzeto sa [36])

4.3. Maseni protokomjeri

Maseni protokomjeri ili inercijalni protokomjeri su uređaji koji mjere maseni protok fluida koji struji kroz cijev. Nemaju unificirani način mjerenja masenog protoka, već ono ovisi od protokomjera do protokomjera. Najčešće korišteni maseni protokomjeri su Coriolisov protokomjer i termodinamički protokomjer.

4.3.1. Coriolisov protokomjer

Coriolisov protokomjer (Slika 4.6.) je instrument koji se koristi za mjerenje masenog protoka tekućina i plinova. Radi na principu Coriolisovog efekta, pojave koja djeluje na sve čestice u rotirajućim sustavima kad se gibaju pod nekim kutom u odnosu na rotacijsku os. U Coriolisovom protokomjeru, vibrirajuća cijev ili set cijevi se koristi za usmjeravanje protoka fluida u obliku slova „U“. Dok fluid prolazi kroz cijevi, uzrokuje lagano uvijanje ili otklon cijevi zbog Coriolisovih sila koje djeluju na fluid. Naime, grana kroz koju fluid struji udaljavajući se od osi vibracije, mora djelovati silom na fluid, kako bi povećala njen kutni moment te se ona savija unatrag. Suprotno, grana kroz koju fluid struji natrag prema osi rotacije mora djelovati silom na fluid da ponovno smanji kutni moment fluida, stoga će se ta grana saviti prema naprijed. Obje grane vibriraju istom frekvencijom,

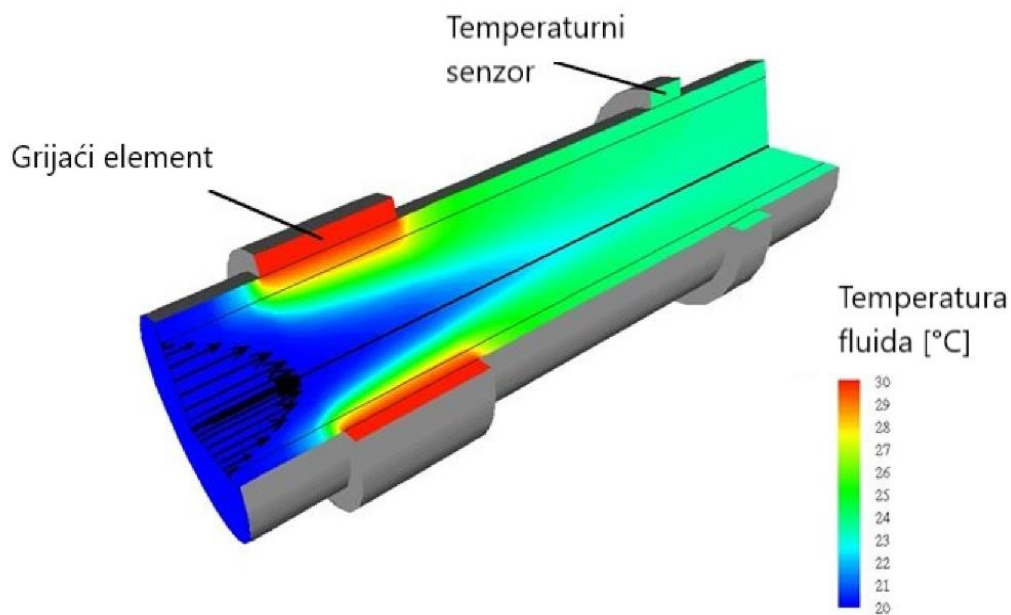


Slika 4.6. Coriolisov protokomjer za mjerenje masenog protoka (preuzeto sa [37])

međutim kada kroz cijevi protječe fluid, vibracije nisu usklađene te jedna grana kasni, a druga rani. Senzori pričvršćeni na cijevi mjere rezultirajući otklon cijevi, odnosno fazni pomak. Analizirajući izmjereni fazni pomak, Coriolisov protokomjer određuje maseni protok fluida. Direktno mjerenje masenog protoka jedna je od ključnih prednosti Coriolisovih protokomjera. [19]

4.3.2. Termodinamički protokomjer

Termodinamički protokomjeri mjere maseni protok na principu prijenosa topline, pri čemu protok fluida preko zagrijanog senzorskog elementa uzrokuje promjenu temperature, koja je zatim povezana s masenim protokom preko zakona termodinamike. Osnovne komponente termodinamičkog protokomjera uključuju grijaći element, temperaturne senzore i upravljački krug. Kada fluid struji oko grijaćeg elementa, on odnosi toplinu konvekcijom, uzrokujući temperaturnu razliku između grijaćeg elementa i temperaturnih senzora. Mjerenjem te temperaturne razlike izračunava se maseni protok fluida na temelju principa prijenosa topline konvekcijom. Prvenstveno se koriste za mjerenje masenog protoka plinova, ali mogu mjeriti i protok tekućina s visokom toplinskom vodljivošću. Direktno mjerenje masenog protoka, velika preciznost i širok raspon protoka neki su od razloga čestog korištenja u industrijskim procesima. Na Slici 4.7. prikazan je temperaturni gradijent u unutrašnjosti termodinamičkog protokomjera pri mjerenju masenog protoka.



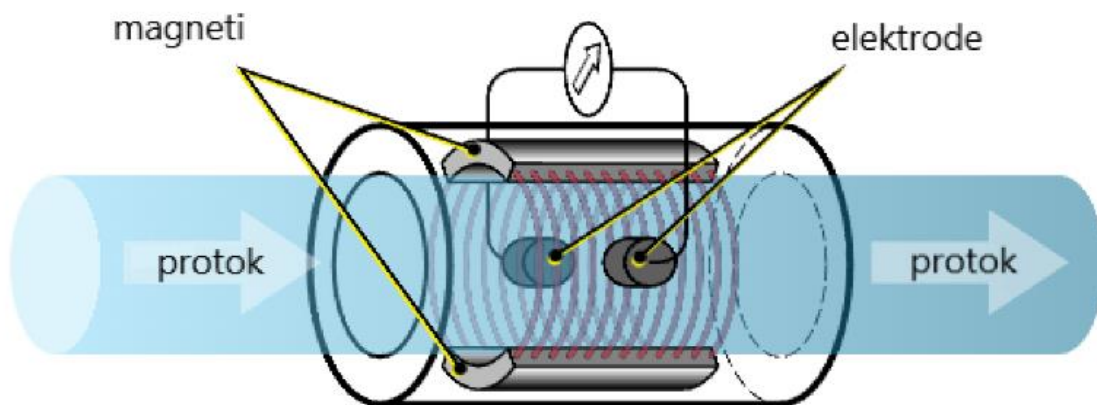
Slika 4.7. Temperaturni gradijent unutar termodinamičkog protokomjera (modificirano prema [38])

4.4. Elektronički protokomjeri

Elektronički protokomjeri su uređaji koji se za mjerenje protoka tekućina ili plinova oslanjaju na elektroničke komponente poput senzora, pretvarača i jedinica za obradu signala, kako bi točno odredili brzinu protoka. Nude prednosti kao što su visoka točnost, širok raspon protoka kompatibilnost s različitim vrstama fluida te minimalni ili nikakav utjecaj na strujanje fluida. Također, moguća je integracija s kontrolnim sustavima i praćenje protoka na više lokacija u stvarnom vremenu na jednom kontrolnom računalu. Primjeri elektroničkih protokomjera su elektromagnetski protokomjer, beskontaktni elektromagnetski protokomjer, ultrazvučni protokomjer, vrtložni protokomjer i laserski Dopplerov protokomjer.

4.4.1. Elektromagnetski protokomjer

Elektromagnetski protokomjer (Slika 4.8.) je uređaj koji mjeri protok na principu Faradayeva zakona elektromagnetske indukcije. Protokomjer se sastoji od protočne cijevi s izolacijom, para elektroda koje su postavljene okomito na smjer protoka i zavojnice sa željeznom jezgrom za stvaranje magnetskoga polja. Pri strujanju tekućine kroz protočnu cijev, stvara se magnetsko polje i inducira napon na elektrodama koji je proporcionalan protoku. Mogu se koristiti kod širokog raspona protoka, veličina cijevi i viskoznosti tekućina. Limitacija elektromagnetskih protokomjera je ta da mogu mjeriti protok samo vodljivim tekućinama jer plinovi nisu vodljivi. [20]

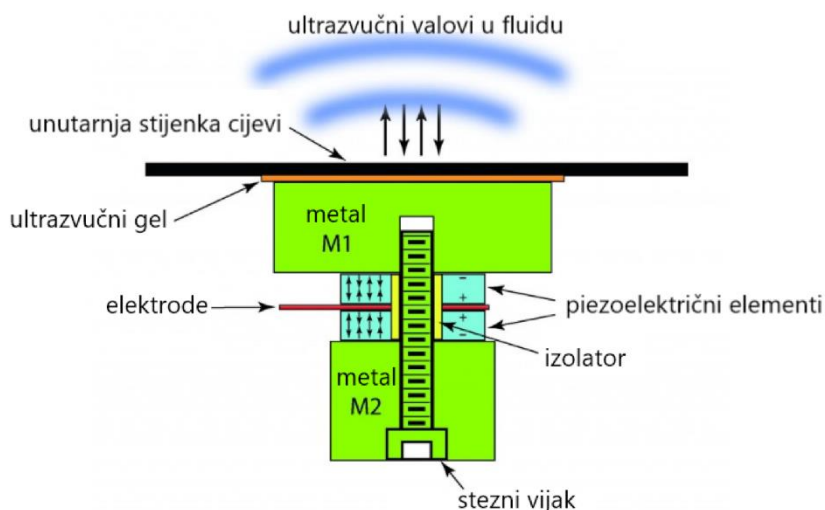


Slika 4.8. Princip rada elektromagnetskog protokomjera (modificirano prema [39])

5. ULTRAZVUČNI PROTOKOMJERI

Ultrazvučni protokomjeri su uređaji koji koriste ultrazvuk za mjerenje protoka fluida, odnosno zvuk ili vibraciju frekvencije iznad 20.000 Hz, koji su nečujni za ljudsko uho. Protokomjer se sastoji od jednog ili dvaju pretvarača u kojima su, ovisno o izvedbi, smješteni i odašiljač i prijamnik ili pak odvojeno, konvertera za obradu signala i prikaz rezultata te para kablova za povezivanje pretvarača i konvertera. Transmiteri u pretvaračima odašilju ultrazvučne valove najčešće uz pomoć piezoelektričnih kristala koji imaju sposobnost pretvaranja električne energije u mehaničku vibraciju i obrnuto. Pretvarači se pričvršćuju s vanjske strane cijevi (Slika 5.1.), ne ometajući nimalo strujanje fluida ni u jednom trenutku mjerenja protoka, što je i jedna od glavnih prednosti protokomjera. Mogu mjeriti protok čistim i zaprljanim tekućinama, teško pristupačnim cijevima, korozivnim tekućinama i plinovima. Limitacije vezane uz korištenje ultrazvučnih protokomjera su nemogućnost preciznog mjerenja protoka ukoliko materijal cijevi ima preveliku apsorpciju ultrazvučnih valova (beton), neprecizni rezultati kod vrlo malih cijevi zbog malog prostora za širenje valova te nepouzdati rezultati mjerenja pri jako turbulentnim strujanjima radi nepredvidivih refleksija i raspršivanja valova. [21]

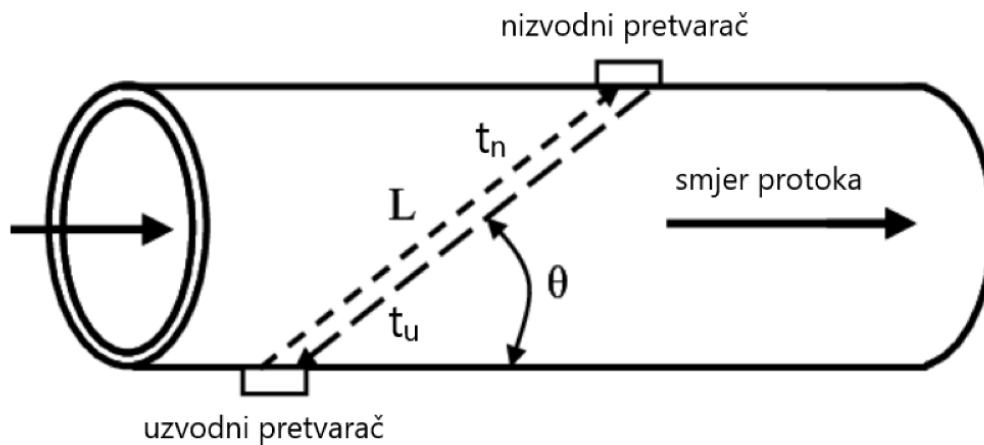
Princip rada ultrazvučnih protokomjera ovisi o tipu protokomjera. Razlikuju se dva tipa: ultrazvučni protokomjer vremena prolaza i ultrazvučni protokomjer frekvencijskog pomaka (Dopplerovi protokomjeri). Iako se bitno razlikuju u načinu na koji mjere protok, zajedničko im je to da oni ne mjere direktno protok, već brzinu fluida te zatim na temelju ulaznih podataka o promjeru cijevi izračunavaju protok.



Slika 5.1. Shematska ilustracija ultrazvučnog pretvarača (modificirano prema [40])

5.1. Ultrazvučni protokomjer vremena prolaza

Princip rada ultrazvučnog protokomjera vremena prolaza temelji se na činjenici da se ultrazvučni valovi brže šire niz struju, nego uz struju fluida. Brzina fluida dobiva se na način da se mjeri razlika vremena širenja valova uz, odnosno niz struju (Slika 5.2.). Ukoliko fluid u cijevi ne struji, neće postojati ta razlika. Budući da ultrazvučni val mora proći kroz cijev da bi ga senzor primio, tekućina ne može imati veću količinu krutih tvari ili mjehurića u svom sastavu jer će zvuk visoke frekvencije biti oslabljen i preslab da bi putovao kroz cijev. [22]



Slika 5.2. Princip rada ultrazvučnog protokomjera vremena prolaza (modificirano prema [41])

Protok se fluida ovom metodom izračunava izrazom (5.1):

$$Q = \frac{D^2 \cdot \pi \cdot c^2}{8 \cdot L \cdot \cos \theta} \Delta t \quad (5.1)$$

gdje je:

D – unutarnji promjer cijevi [m]

c – brzina zvuka u fluidu [m/s]

L – udaljenost pretvarača [m]

θ – kut između signala i strujanja fluida [°]

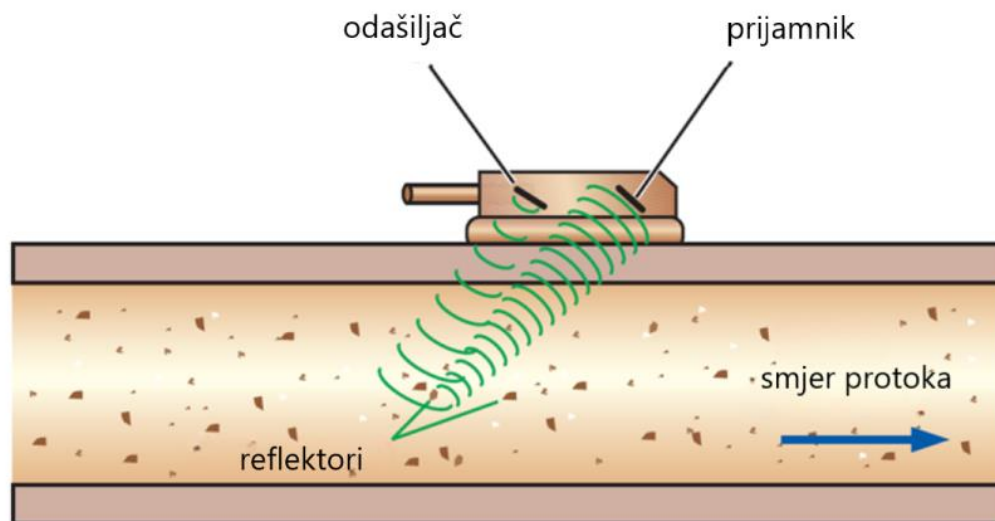
Δt – razlika između vremena prolaza uzvodnog i nizvodnog signala [s]

Ultrazvučni protokomjeri vremena prolaza u teoriji mogu biti vrlo precizni, uz grešku od oko 0,1 %. U praksi se greške javljaju zbog nemogućnosti elektronike za obradu signala da konstantno

mjeri s maksimalnim signalom zbog materijala cijevi, pojave mjehurića, refleksije signala, itd. Osim toga, varijacije u temperaturi i gustoći utječu na brzinu zvuka u fluidu te će tada rezultat imati određenu grešku, ukoliko se isto ne kompenzira. [22]

5.2. Ultrazvučni protokomjeri frekvencijskog pomaka (Dopplerovi protokomjeri)

Dopplerovi protokomjeri, s druge strane, rade na principu Dopplerova efekta, odnosno promjene frekvencije vala koju opaža promatrač koji se kreće relativno u odnosu na izvor vala. U kontekstu ovih protokomjera, frekvencija odašlanog ultrazvučnog vala mijenja se na temelju relativnog gibanja između izvora vala (pretvarač) i gibajućeg objekta. Da bi se valovi reflektirali od gibajućih objekata i pravilno detektirali, mora postojati barem 100 ppm (engl. *parts per million*, dijelova na milijun) suspendiranih čestica ili mjehurića plina (reflektora) dimenzija većih od 100 mikrometara. Frekvencija ultrazvučnog signala se mijenja izravno proporcionalno brzini protoka tekućine kada je signal reflektiran od reflektora pri širenju (Slika 5.3.). Frekvencija valova raste povećanjem brzine reflektora. Dopplerovi se protokomjeri, za razliku od onih na principu vremena prolaza koji mogu mjeriti samo čiste fluide, koriste za mjerenje protoka zaprljanih tekućina, otpadnih voda, cjevovoda industrijskih procesa, i sl. [21]



Slika 5.3. Princip rada ultrazvučnog protokomjera frekvencijskog pomaka (modificirano prema [43])

5.3. Ultrazvučni protokomjer FDT-21

Ultrazvučni protokomjer korišten u ovom radu jest protokomjer FDT-21 američkog proizvođača *Omega Engineering*. Riječ je o protokomjeru vremena prolaza s dva pretvarača koji funkcioniraju kao odašiljači i prijammnici. Pretvarači se stežu s vanjske strane cijevi na određenoj međusobnoj udaljenosti, pri čemu se mogu montirati u V-metodi gdje ultrazvuk prelazi cijev dva puta, W-metodi gdje isti prolazi četiri puta ili pak Z-metodi gdje su pretvarači postavljeni na suprotnim stranama cijevi i ultrazvuk prelazi jednom. Odabir metode ovisi o karakteristikama cijevi i tekućini. Konverter za obradu signala ima ugrađen LCD display i tipkovnicu za laki unos parametara protoka. Na Slici 5.4. prikazan je set pribora korišten za mjerenje protoka. Brojem 1 označen je konverter, brojem 2 ultrazvučni pretvarači, brojem 3 i 4 kablovi za povezivanje pretvarača i konvertera, brojem 5 ultrazvučni gel te brojem 6 adapter za punjenje baterije. [23]



Slika 5.4. Set pribora ultrazvučnog protokomjera FDT-21 (izvor: autor)

U Tablici 5.1. dane su tehničke specifikacije korištenog protokomjera.

Tablica 5.1. Tehničke specifikacije ultrazvučnog protokomjera FDT-21 (modificirano prema [23])

| | |
|---------------------------|---|
| Linearnost | 0,5 % |
| Ponovljivost | 0,2 % |
| Točnost | ±1 % očitavanja pri brzinama > 0,2 mps |
| Vrijeme odziva | 0-999 sekundi, korisnički konfigurabilan |
| Raspon brzina | ±32 m/s |
| Raspon veličina cijevi | 20 mm - 6000 mm |
| Mjerne jedinice | Metar, stopa, kubični metar, litra, kubična stopa, američki galon, imperijalni galon, barel nafte, američki barel, imperijalni barel, milijun američkih galona, korisnički konfigurabilan |
| Totalizator | 7-znamenkasti ukupni iznos za neto, pozitivan i negativan protok |
| Vrste tekućina | Gotovo sve tekućine |
| Sigurnost | Zaključavanje modifikacije unesenih vrijednosti. Potreban unos pristupne lozinke |
| Prikaz | 4x8 kineskih znakova ili 4x16 engleskih slova |
| Komunikacijsko sučelje | RS-232C, brzina prijenosa podataka: od 75 do 57600 |
| Pretvarači | Model M1 za standard, ostala 3 modela za izbor |
| Duljina kabela pretvarača | Standardni 2x10 metara, opcionalni 2x500 metara |
| Napajanje | 3 AAA Ni-H ugrađene baterije. Potpuno napunjene će izdržati preko 10 sati rada 100V-240V AC za punjač |
| Zapisivač podataka | Ugrađeni zapisivač podataka može pohraniti više od 2000 redaka podataka |
| Ručni totalizator | 7-znamenkasti „pritisnite tipku za odlazak“ totalizator za kalibraciju |
| Materijal kućišta | ABS |
| Veličina uređaja | 100x66x20 mm |
| Masa uređaja | 514 g (s baterijama) |

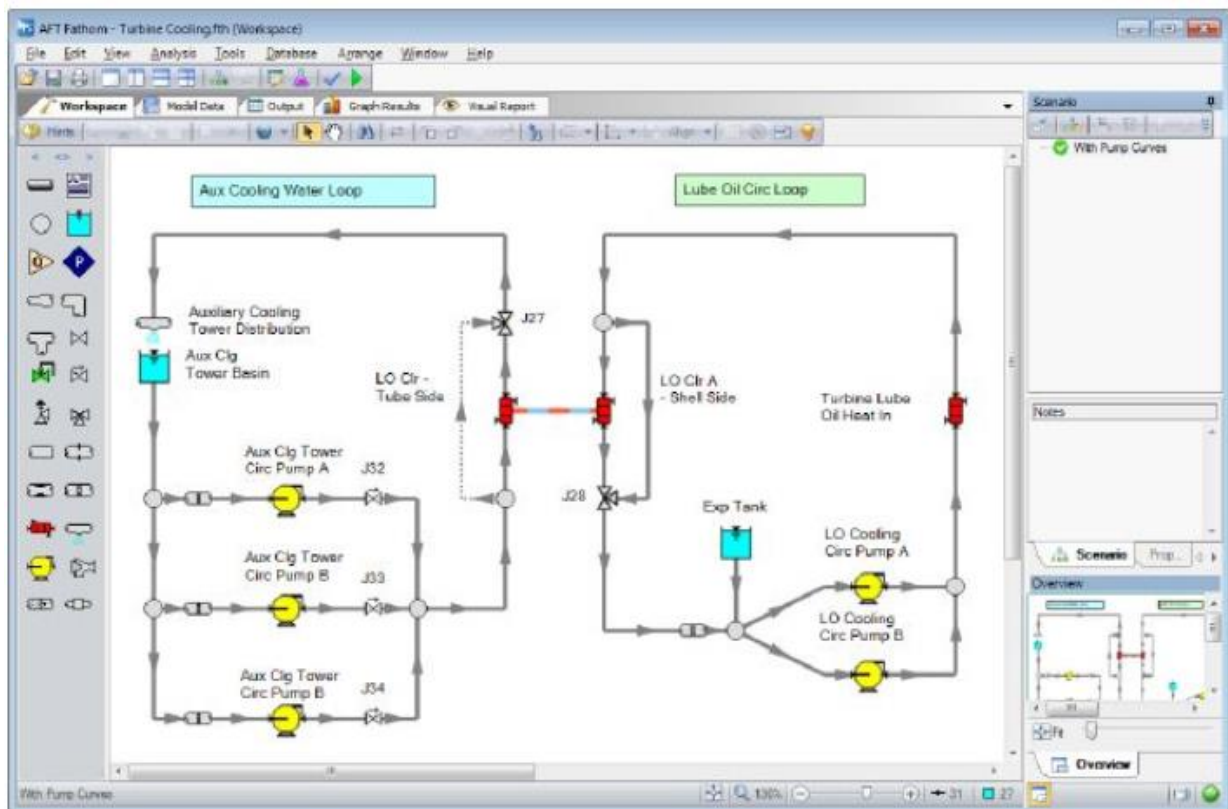
6. AFT FATHOM

Računalna simulacija napravljena je uz pomoć softvera *AFT Fathom* tvrtke *Applied Flow Technology*. *AFT Fathom* je softver za simulaciju dinamike fluida, koji se koristi za izračunavanje pada tlaka i distribucije protoka u cjevovodima te u sustavima kanala.

Neke od značajke softvera su:

- Precizna simulacija pojedinačnih komponenti sustava i međusobne interakcije,
- Čvrsta integracija karakteristike opreme, analize i izlaza sa shematskim prikazom sustava,
- Značajno poboljšava kvalitetu projektiranja sustava, što dovodi do jeftinijih, učinkovitijih i pouzdanijih sustava cjevovoda. [24]

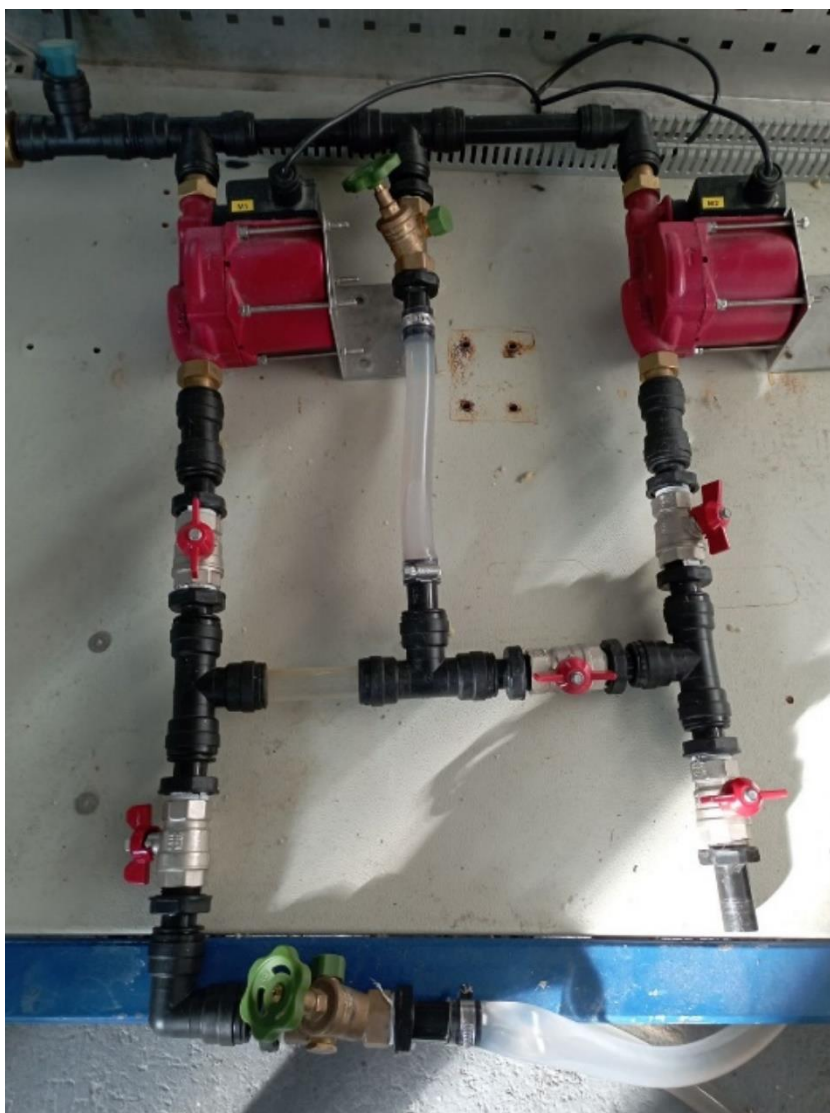
AFT Fathom pojednostavljuje složene hidrauličke scenarije, dajući točne rezultate i detaljnu vizualizaciju. Korisnici mogu s lakoćom kreirati i manipulirati modelima sustava, definirajući svojstva cijevi, rubne uvjete i svojstva fluida. Nadalje, softver podržava upravljanje scenarijima, dopuštajući korisnicima da usporede više opcija dizajna i analiziraju njihov utjecaj na performanse sustava. Na Slici 6.1. prikazano je korisničko sučelje softvera.



Slika 6.1. Korisničko sučelje softvera *AFT Fathom* [42]

7. LABORATORIJSKO MJERENJE PROTOKA

Mjerenje protoka provedeno je u laboratoriju u hali na Tehničkom fakultetu u Rijeci. Na laboratorijskom stolu postavljen je zatvoreni krug sastavljen od cijevi, dviju pumpi, glavnog ventila, kontrolnog mjernog uređaja te ostalih dijelova poput koljena, T-spojeva i ventila. Prije pokretanja pumpi, provjereno je jesu li na ispravan način spojene sve komponente. Nakon provjere, pumpe su pokrenute kako bi se uvidjela ispravnost cjevovoda, odnosno dolazi li negdje do propuštanja vode. Po završetku provjere, pumpe su ugašene radi pripremanja ultrazvučnog protokomjera za mjerenje protoka. Konfiguracija pumpi prikazana je na Slici 7.1. Glavni ventil se nalazi na donjoj grani, dok je ventil u srednjoj grani (između dviju pumpi) zatvoren.



Slika 7.1. Konfiguracija pumpi (izvor: autor)

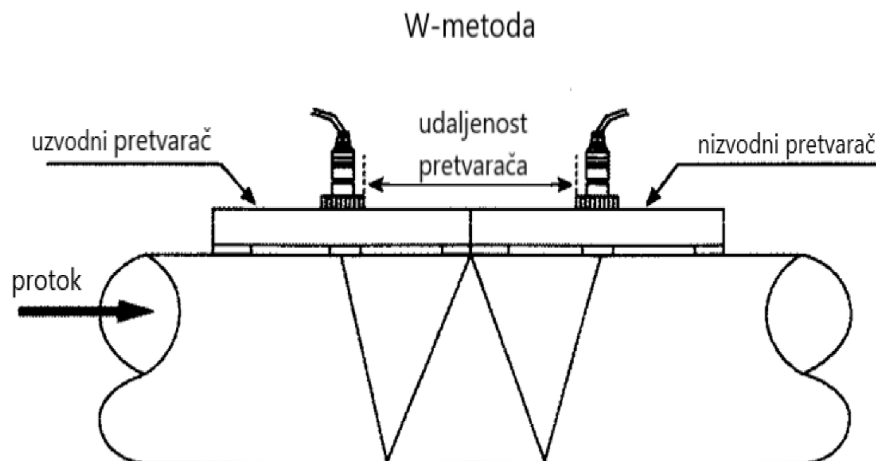
7.1. Priprema i instalacija ultrazvučnog protokomjera

Prije početka mjerenja protoka, potrebno je postaviti, odnosno unijeti ulazne podatke u uređaj. Ulazni podaci uneseni u uređaj dani su u Tablici 7.1.

Tablica 7.1. Ulazni podaci

| | |
|--------------------------|----------|
| Unutarnji promjer cijevi | 18,5 mm |
| Vanjski promjer cijevi | 22 mm |
| Debljina stijenke cijevi | 1,75 mm |
| Fluid | voda |
| Materijal cijevi | PVC |
| Metoda mjerenja | W-metoda |

Odabrana je W-metoda mjerenja (Slika 7.2.) zbog vrlo malog promjera cijevi, prema uputama korisničkog priručnika protokomjera gdje stoji da se ta metoda koristi za plastične cijevi od 10 mm – 100 mm. Nakon toga potrebno je kablovima povezati pretvarače s konverterom, pazeći da uzvodni pretvarač označen crvenom bojom, odnosno nizvodni pretvarač označen plavom, budu povezani na odgovarajuće priključke na konverteru. Potom se na pretvarače nanosi ultrazvučni kontaktni gel koji djeluje kao medij koji pomaže u prijenosu ultrazvučnih valova koje stvara pretvarač i bez kojeg rezultati mjerenja ne bi bili ispravni. Na Slici 7.3. prikazan je gel nanesen na pretvarače. Površinu na koju se postavljaju pretvarači, potrebno je prethodno očistiti alkoholom ili nekom drugom sličnom



Slika 7.2. W-metoda mjerenja protoka (modificirano prema [23])

tvari. Prije postavljanja pretvarača na cijev, neophodno je ustanoviti kojim smjerom struji protok kako bi se ispravno postavili uzvodni i nizvodni pretvarači. Zbog vrlo malog promjera cijevi, pretvarači su postavljeni jedan do drugog, bez razmaka između njih, te se pričvršćuju ljepljivom trakom kako bi u radu bili fiksirani (Slika 7.4).



Slika 7.3. Naneseni gel na pretvaračima (izvor: autor)



Slika 7.4. Ispravno postavljeni pretvarači na cijev (izvor: autor)

7.2. Rezultati mjerenja protoka

Završivši s fazom pripreme i instalacije protokomjera, moguće je započeti s mjerenjem protoka. Da bi se dobio veći broj rezultata, mjerenje je obavljeno pri različitim protocima koji su dobiveni okretanjem glavnog ventila. Za ostvarivanje maksimalnog protoka korištene su obje pumpe, dok je kod nižih korištena samo jedna. Izmjerene vrijednosti dane su u Tablici 7.2.

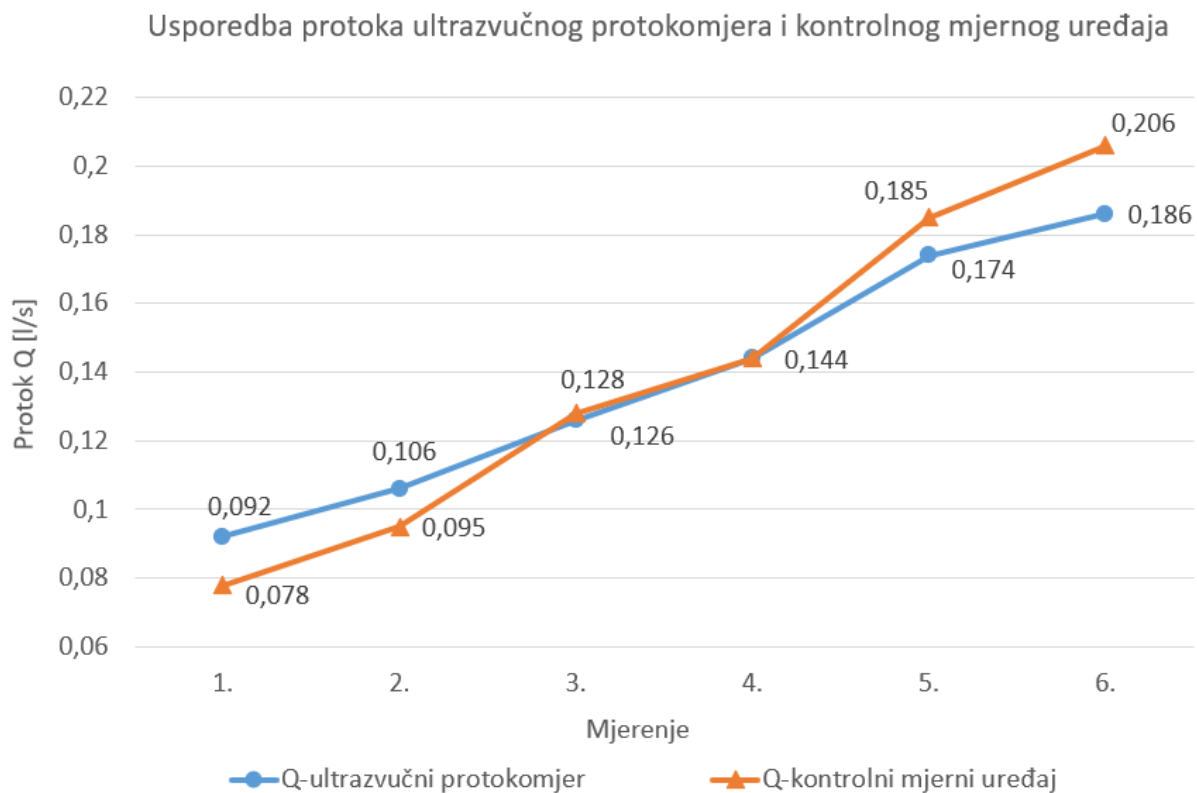
Tablica 7.2. Vrijednosti protoka i brzina fluida (izvor: autor)

| Ultrazvučni protokomjer FDT-21 | | Kontrolni mjerni uređaj |
|--------------------------------|------------------|-------------------------|
| Protok Q [l/s] | Brzina v [m/s] | Protok Q [l/s] |
| 0,186 | 0,692 | 0,206 |
| 0,174 | 0,647 | 0,185 |
| 0,144 | 0,536 | 0,144 |
| 0,126 | 0,469 | 0,128 |
| 0,106 | 0,394 | 0,095 |
| 0,092 | 0,342 | 0,078 |

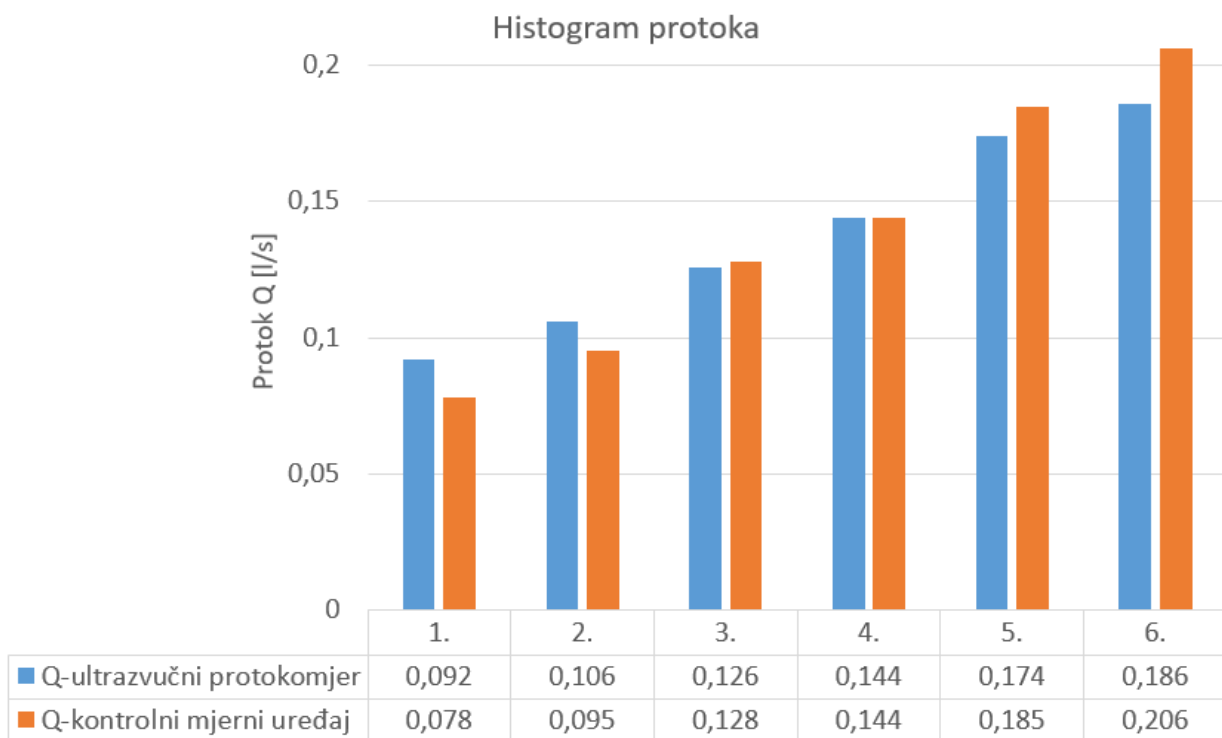
Iz rezultata je vidljivo minimalno ili nikakvo odstupanje kod srednje velikih protoka. Kod većih protoka odstupanja su veća te iznose 5,95 %, odnosno 9,71 %. Kod nižih protoka, također se zapažaju veća odstupanja u odnosu na srednje velikih protoka te iznose 11,57 %, odnosno 17,95 %. Kod malih protoka zapažena je pojava mjehurića zraka u cjevovodu vjerojatno zbog premalog protoka, za koji pumpa nije projektirana te koji bitno utječu na kvalitetu mjerenja protokomjera. Prosječno odstupanje za zadani raspon protoka iznosi 7,79 %.

Također, kod manjih protoka, uočena je tendencija prikazivanja većih vrijednosti kod ultrazvučnog protokomjera u odnosu na kontrolni mjerni uređaj. Slično tome, kod većih protoka, protokomjer prikazuje niže vrijednosti od mjernog uređaja.

Na Slici 7.5. grafički je prikazana usporedba protoka ultrazvučnog protokomjera i kontrolnog mjernog uređaja uz pomoć programa *Microsoft Excel* te je dan histogram protoka na Slici 7.6.



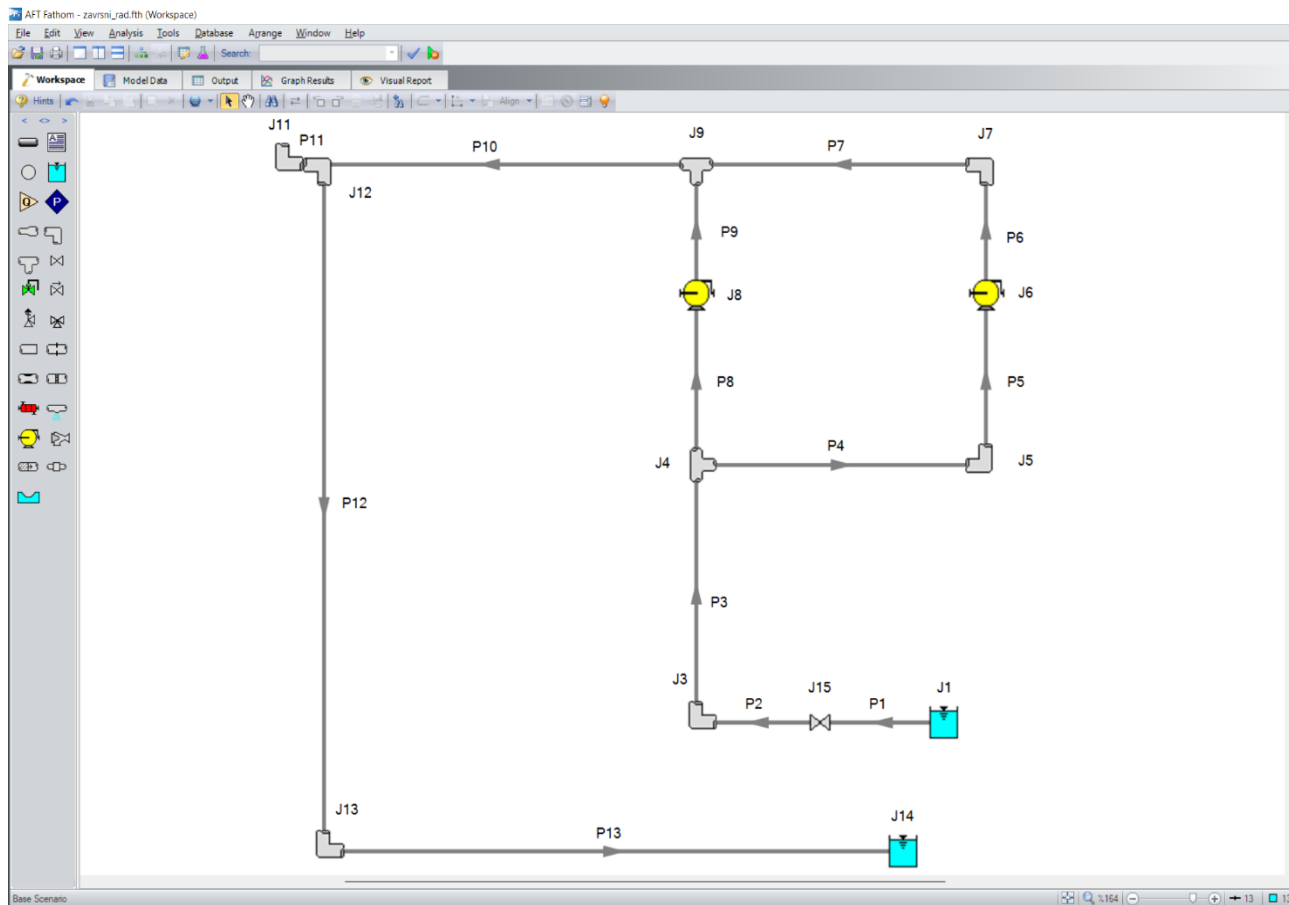
Slika 7.5. Grafički prikaz usporedbe protoka ultrazvučnog protokomjera i kontrolnog mjernog uređaja (izvor: autor)



Slika 7.6. Histogram protoka (izvor: autor)

8. RAČUNALNA SIMULACIJA CJEVODNOG SUSTAVA

Koristeći softver *AFT Fathom 9* provedena je simulacija cjevovodnog sustava za maksimalni protok. Da bi se izvršila simulacija, potrebno je složiti shemu komponenti sustava. Svaka se komponenta prije pokretanja simulacije mora definirati. Početak, odnosno izvor vode i kraj sustava čine spremnici. Budući da su sve cijevi od istog materijala (PVC) i promjera, međusobno se razlikuju samo u duljini. Koljena su uzeta kao standardna pod kutom od 90°, a T-spojevi su zaobljenog tipa pod pravim kutom. Za glavni ventil odabran je Y globe ventil. Kod pumpi unesen je fiksni volumetrijski protok, upola manji od izmjerenog, kako bi u T-spoju iza pumpi bio jednak izmjerenom. Iako su sada sve komponente definirane, treba pripaziti na elevaciju dijela sustava cjevovoda koji se nalazi na laboratorijskom stolu i koja iznosi 76 cm. Potpuno definirana shema prikazana je na Slici 8.1. Vertikalna cijev nalazi se između čvorova 11 i 12. Detaljni podaci pojedinih cijevi dani su u tablici na Slici 8.2. dobivenoj u softveru unutar kartice „*Model Data*“.



Slika 8.1. Shema cjevovodnog sustava (izvor: autor)

| Pipe | Name | Pipe Defined | Length | Length Units | Hydraulic Diameter | Hydraulic Diam. Units | Friction Data Set | Roughness | Roughness Units | Losses (K) | Junctions (Up,Down) | Geometry | Material | Size | Type |
|------|------|--------------|-------------|--------------|--------------------|-----------------------|-------------------|--------------|-----------------|------------|---------------------|------------------|------------|----------|---------|
| 1 | Pipe | Yes | 12 cm | | 18.1864 mm | | Unspecified | 0.001524 cm | | 0 | 1, 2 | Cylindrical Pipe | PVC - ASTM | 1/2 inch | SDR13.5 |
| 2 | Pipe | Yes | 12 cm | | 18.1864 mm | | Standard | 0.0001524 cm | | 0 | 2, 3 | Cylindrical Pipe | PVC - ASTM | 1/2 inch | SDR13.5 |
| 3 | Pipe | Yes | 20 cm | | 18.1864 mm | | Standard | 0.0001524 cm | | 0 | 3, 4 | Cylindrical Pipe | PVC - ASTM | 1/2 inch | SDR13.5 |
| 4 | Pipe | Yes | 37 cm | | 18.1864 mm | | Standard | 0.0001524 cm | | 0 | 4, 5 | Cylindrical Pipe | PVC - ASTM | 1/2 inch | SDR13.5 |
| 5 | Pipe | Yes | 30 cm | | 18.1864 mm | | Standard | 0.0001524 cm | | 0 | 5, 6 | Cylindrical Pipe | PVC - ASTM | 1/2 inch | SDR13.5 |
| 6 | Pipe | Yes | 15 cm | | 18.1864 mm | | Standard | 0.0001524 cm | | 0 | 6, 7 | Cylindrical Pipe | PVC - ASTM | 1/2 inch | SDR13.5 |
| 7 | Pipe | Yes | 37 cm | | 18.1864 mm | | Standard | 0.0001524 cm | | 0 | 7, 9 | Cylindrical Pipe | PVC - ASTM | 1/2 inch | SDR13.5 |
| 8 | Pipe | Yes | 30 cm | | 18.1864 mm | | Standard | 0.0001524 cm | | 0 | 4, 8 | Cylindrical Pipe | PVC - ASTM | 1/2 inch | SDR13.5 |
| 9 | Pipe | Yes | 15 cm | | 18.1864 mm | | Standard | 0.0001524 cm | | 0 | 8, 9 | Cylindrical Pipe | PVC - ASTM | 1/2 inch | SDR13.5 |
| 10 | Pipe | Yes | 82 cm | | 18.1864 mm | | Standard | 0.0001524 cm | | 0 | 9, 10 | Cylindrical Pipe | PVC - ASTM | 1/2 inch | SDR13.5 |
| 11 | Pipe | Yes | 76 cm | | 18.1864 mm | | Standard | 0.0001524 cm | | 0 | 10, 11 | Cylindrical Pipe | PVC - ASTM | 1/2 inch | SDR13.5 |
| 12 | Pipe | Yes | 40 cm | | 18.1864 mm | | Standard | 0.0001524 cm | | 0 | 11, 12 | Cylindrical Pipe | PVC - ASTM | 1/2 inch | SDR13.5 |
| 13 | Pipe | Yes | 85.00003 cm | | 18.1864 mm | | Standard | 0.0001524 cm | | 0 | 12, 13 | Cylindrical Pipe | PVC - ASTM | 1/2 inch | SDR13.5 |

Slika 8.2. Podaci o pojedinim cijevima cjevovodnog sustava (izvor: autor)

Nakon definiranja svih komponenti pokreće se simulacija. Unutar kartice „Output“ nalaze se rezultati simulacije u cijevima i čvorovima, prikazani tablično na Slici 8.3. Za svaku cijev, dobivaju se protok, brzina fluida, maksimalni i minimalni statički te stagnacijski tlak, kao i gubici istih, gubici izraženi piezometričnom visinom, te navedeni tlakovi na ulazu i izlazu cijevi. Kod čvorova se

| Pipe | Name | Vol. Flow Rate (liter/sec) | Velocity (meters/sec) | P Static Max (bar) | P Static Min (bar) | Elevation Inlet (meters) | Elevation Outlet (meters) | dP Stag. Total (bar) | dP Static Total (bar) | dP Gravity (bar) | dH (meters) | P Static In (bar) | P Static Out (bar) | P Stag. In (bar) | P Stag. Out (bar) |
|------|------|----------------------------|-----------------------|--------------------|--------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------|-----------------------|------------------|-------------|-------------------|--------------------|------------------|-------------------|
| 1 | Pipe | 0.2060 | 0.7930 | 1.010 | 1.0095 | 0.0000 | 0.0000 | 5.971E-04 | 5.971E-04 | 0 | 0.006106 | 1.010 | 1.0095 | 1.013 | 1.013 |
| 2 | Pipe | 0.2060 | 0.7930 | 1.005 | 1.0049 | 0.0000 | 0.0000 | 5.679E-04 | 5.679E-04 | 0 | 0.005807 | 1.005 | 1.0049 | 1.009 | 1.008 |
| 3 | Pipe | 0.2060 | 0.7930 | 1.002 | 1.0016 | 0.0000 | 0.0000 | 9.465E-04 | 9.465E-04 | 0 | 0.009679 | 1.002 | 1.0016 | 1.006 | 1.005 |
| 4 | Pipe | 0.1030 | 0.3965 | 1.001 | 1.0009 | 0.0000 | 0.0000 | 5.233E-04 | 5.233E-04 | 0 | 0.005351 | 1.001 | 1.0009 | 1.002 | 1.002 |
| 5 | Pipe | 0.1030 | 0.3965 | 1.000 | 0.9999 | 0.0000 | 0.0000 | 4.243E-04 | 4.243E-04 | 0 | 0.004339 | 1.000 | 0.9999 | 1.001 | 1.001 |
| 6 | Pipe | 0.1030 | 0.3965 | 1.110 | 1.1095 | 0.0000 | 0.0000 | 2.121E-04 | 2.121E-04 | 0 | 0.002169 | 1.110 | 1.1095 | 1.110 | 1.110 |
| 7 | Pipe | 0.1030 | 0.3965 | 1.109 | 1.1084 | 0.0000 | 0.0000 | 5.233E-04 | 5.233E-04 | 0 | 0.005351 | 1.109 | 1.1084 | 1.110 | 1.109 |
| 8 | Pipe | 0.1030 | 0.3965 | 1.004 | 1.0035 | 0.0000 | 0.0000 | 4.243E-04 | 4.243E-04 | 0 | 0.004339 | 1.004 | 1.0035 | 1.005 | 1.004 |
| 9 | Pipe | 0.1030 | 0.3965 | 1.108 | 1.1081 | 0.0000 | 0.0000 | 2.121E-04 | 2.121E-04 | 0 | 0.002169 | 1.108 | 1.1081 | 1.109 | 1.109 |
| 10 | Pipe | 0.2060 | 0.7930 | 1.105 | 1.1011 | 0.0000 | 0.0000 | 3.881E-03 | 3.881E-03 | 0 | 0.039684 | 1.105 | 1.1011 | 1.108 | 1.104 |
| 11 | Pipe | 0.2060 | 0.7930 | 1.099 | 1.0951 | 0.0000 | 0.0000 | 3.597E-03 | 3.597E-03 | 0 | 0.036780 | 1.099 | 1.0951 | 1.102 | 1.098 |
| 12 | Pipe | 0.2060 | 0.7930 | 1.018 | 1.0165 | 0.7600 | 0.7600 | 1.893E-03 | 1.893E-03 | 0 | 0.019358 | 1.018 | 1.0165 | 1.022 | 1.020 |
| 13 | Pipe | 0.2060 | 0.7930 | 1.014 | 1.0101 | 0.7600 | 0.7600 | 4.023E-03 | 4.023E-03 | 0 | 0.041137 | 1.014 | 1.0101 | 1.017 | 1.013 |

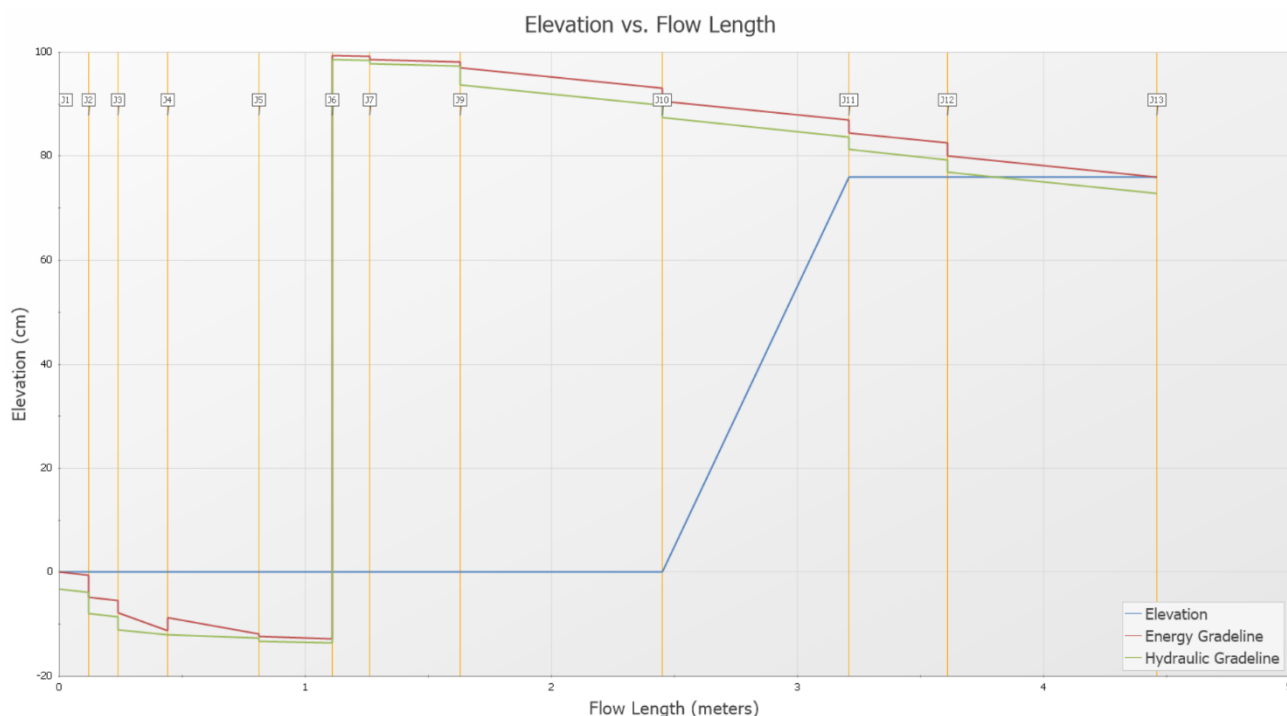
| Jct | Name | P Static In (bar) | P Static Out (bar) | P Stag. In (bar) | P Stag. Out (bar) | Vol. Flow Rate Thru Jct (liter/sec) | Mass Flow Rate Thru Jct (kg/sec) | Loss Factor (K) | dH (meters) |
|-----|------------|-------------------|--------------------|------------------|-------------------|-------------------------------------|----------------------------------|------------------|------------------|
| 1 | Reservoir | 1.0133 | 1.013 | 1.013 | 1.013 | 0.2060 | 0.2054 | 0.0000 | 0.000000 |
| 2 | Valve | 1.0095 | 1.005 | 1.013 | 1.009 | 0.2060 | 0.2054 | 1.3000 | 0.041683 |
| 3 | Bend | 1.0049 | 1.002 | 1.008 | 1.006 | 0.2060 | 0.2054 | 0.7582 | 0.024310 |
| 4 | Tee or Wye | 1.0033 | 1.003 | 1.005 | 1.005 | N/A | N/A | See Mult. Losses | See Mult. Losses |
| 5 | Bend | 1.0009 | 1.000 | 1.002 | 1.001 | 0.1030 | 0.1027 | 0.7582 | 0.006077 |
| 6 | Pump | 0.9999 | 1.110 | 1.001 | 1.110 | 0.1030 | 0.1027 | 0.0000 | -1.122536 |
| 7 | Bend | 1.1095 | 1.109 | 1.110 | 1.110 | 0.1030 | 0.1027 | 0.7582 | 0.006077 |
| 8 | Pump | 1.0035 | 1.108 | 1.004 | 1.109 | 0.1030 | 0.1027 | 0.0000 | -1.072104 |
| 9 | Tee or Wye | 1.1067 | 1.107 | 1.108 | 1.108 | N/A | N/A | See Mult. Losses | See Mult. Losses |
| 10 | Bend | 1.1011 | 1.099 | 1.104 | 1.102 | 0.2060 | 0.2054 | 0.7582 | 0.024310 |
| 11 | Bend | 1.0208 | 1.018 | 1.024 | 1.022 | 0.2060 | 0.2054 | 0.7582 | 0.024310 |
| 12 | Bend | 1.0165 | 1.014 | 1.020 | 1.017 | 0.2060 | 0.2054 | 0.7582 | 0.024310 |
| 13 | Reservoir | 1.0133 | 1.013 | 1.013 | 1.013 | 0.2060 | 0.2054 | 0.0000 | 0.000000 |

| Jct | Pipe # | Pipe Dir. | dH (meters) | Loss Factor (K) |
|-----|--------|-----------|-------------|-----------------|
| 4 | P3 | In | 0.000 | 0.000 |
| | P8 | Out | 0.000 | 0.000 |
| | P4 | Out | 0.02490 | 3.107 |
| 9 | P10 | Out | 0.000 | 0.000 |
| | P7 | In | 0.01079 | 1.347 |
| | P9 | In | 8.123E-03 | 1.013 |

Slika 8.3. Rezultati simulacije protoka (izvor: autor)

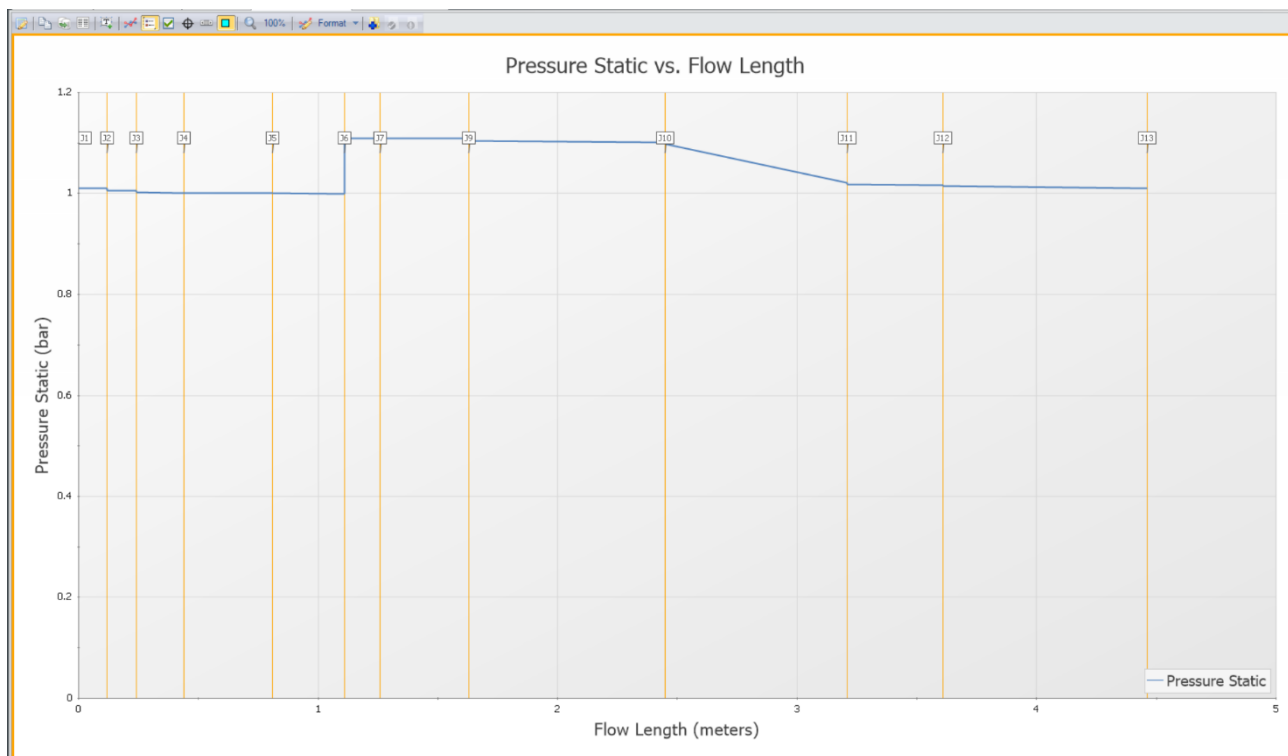
iščitavaju vrijednosti za statički i stagnacijski tlak na ulazu i izlazu čvora, volumetrijski i maseni protok te koeficijent lokalnog gubitka i gubici izraženi piezometričnom visinom. Bitno je napomenuti da osim navedenih parametara, ovisno o potrebi, softver može proračunati i brojne druge.

Unutar kartice „*Graph results*“ moguće je dobiti grafičke prikaze parametara kroz cjelokupnu duljinu cjevovoda. Na Slici 8.4. prikazana je usporedba nekih od parametara: energetskog i hidrauličkog razreda te elevacije. Budući da je grafički prikaz moguće dobiti samo za cijevi koje čine kontinuirani tok strujanja, grafom su izostavljene cijevi 8 i 9, čime je nakon čvora 4 obuhvaćena samo desna grana strujanja.



Slika 8.4. Usporedba elevacije te energetskog i hidrauličkog razreda po duljini cijevi (izvor: autor)

Također, dan je prikaz statičkog tlaka po duljini cijevi na Slici 8.5. Vidljivo je da statički tlak opada strujeći u cijevima nakon izvora vode iz spremnika. U čvoru 6 statički tlak naglo raste zbog pumpe te zatim opet blago opada. Između čvorova 10 i 11 (vertikalna cijev), tlak po duljini se naglije smanjuje zbog dodatne energije potrebne za podizanje tekućine. Međutim, ukupni statički tlak raste jer tekućina dobiva potencijalnu energiju dok se kreće protiv gravitacije.



Slika 8.5. Statički tlak po duljini cijevi (izvor: autor)

9. ZAKLJUČAK

Protokomjeri su uređaji koji se koriste za mjerenje protoka tekućina i plinova u raznim primjenama. Dolaze u različitim vrstama, od kojih svaka ima specifične karakteristike prikladne za različite industrije i fluide. Protokomjeri igraju ključnu ulogu u praćenju procesa, optimiziranju učinkovitosti i osiguravanju točne naplate za komunalije. Nalaze primjenu u industrijama kao što su naftna industrija, obrada vode, kemijska proizvodnja, farmaceutski proizvodi i prerada hrane. Davanjem podataka o protoku u stvarnom vremenu, protokomjeri pomažu operaterima da ostvare preciznu kontrolu nad operacijama, otkriju curenje i spriječe rasipanje. Osim toga, koriste se u praćenju okoliša za mjerenje protoka vode u rijekama i potocima, pomažući u upravljanju vodnim resursima i ekološkim studijama.

Zadatak završnog rada bio je mjerenje protoka fluida cjevovodnom sustavu. U eksperimentu se koristio ultrazvučni protokomjer koji pri mjerenju ni na koji način ne utječe na strujanje fluida u cjevovodnom sustavu. Cjevovodni sustav sačinjen je od PVC cijevi promjera 18,5 mm. Korištena je W-metoda mjerenja za cijeli raspon protoka. Kod srednje velikih protoka zapaženo je minimalno ili nikakvo odstupanje u odnosu na kontrolni mjerni uređaj. Kod manjih protoka uočena su veća odstupanja zbog stvaranja mjehurića zraka u strujanju fluida kroz cijev. Mjehurići negativno utječu na rezultate mjerenja zbog načina na koji ultrazvučni protokomjeri vremena prolaza mjere protok. Prosječno odstupanje ostvareno mjerenjem iznosi 7,79 %, što je prihvatljivo ukoliko se uzme u obzir prethodno navedeni razlozi i činjenica da je promjer cijevi blizu donje granice mjerljivog raspona W-metode.

Zaključuje se da je ultrazvučni protokomjer vjerodostojan mjerač protoka koji ne ometa strujanje fluida, što ga čini vrijednim alatom za praćenje i optimizaciju procesa.

10. LITERATURA

- [1] "Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021.", s interneta, <https://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=25421>, pristupljeno 10. svibnja 2023.
- [2] "Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021.", s interneta, <https://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=25436>, pristupljeno 10. svibnja 2023.
- [3] "Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021.", s interneta, <https://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=25393>, pristupljeno 10. svibnja 2023.
- [4] "Wikipedia", s interneta, https://en.wikipedia.org/wiki/Fluid_mechanics, pristupljeno 10. svibnja 2023.
- [5] Enviropro: "What is the importance of flow rate measurement?", s interneta, <https://www.enviropro.co.uk/entry/149002/Brkert-Fluid-Control-Systems/What-is-the-importance-of-flow-rate-measurement>, pristupljeno 11. svibnja 2023.
- [6] "Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021.", s interneta, <https://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=58473>, pristupljeno 12. svibnja 2023.
- [7] SimScale: "What is Reynolds Number?", s interneta, <https://www.simscale.com/docs/simwiki/numerics-background/what-is-the-reynolds-number>, pristupljeno 13. svibnja 2023.
- [8] The Constructor: "Laminar Flow and Turbulent Flow", s interneta, <https://theconstructor.org/fluid-mechanics/laminar-turbulent-flow/559432>, pristupljeno 13. svibnja 2023.
- [9] "Wikipedia", s interneta, https://en.wikipedia.org/wiki/Laminar_flow, pristupljeno 13. svibnja 2023.
- [10] "Wikipedia", s interneta, <https://en.wikipedia.org/wiki/Turbulence>, pristupljeno 12. svibnja 2023.

- [11] S.B.A. Invent: "Transitional Flow", s interneta, <https://sbainvent.com/fluid-mechanics/transitional-flow/>, pristupljeno 15. svibnja 2023.
- [12] Kranjčević, L. (2020.) Mehanika fluida: Skripta za studente Tehničkog fakulteta u Rijeci, Rijeka, 2023.
- [13] "Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021.", s interneta, <https://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=50759>, pristupljeno 16. svibnja 2023.
- [14] OMEGA Engineering: "Mechanical Flow meters", s interneta, <https://www.omega.com/en-us/resources/mechanical-flow-meter>, pristupljeno 28. svibnja 2023.
- [15] Instrumentation Tools: "Turbine Flow Meter Working Principle", s interneta, <https://instrumentationtools.com/turbine-flow-meter-working-principle>, pristupljeno 28. svibnja 2023.
- [16] "Wikipedia", s interneta, https://en.wikipedia.org/wiki/Orifice_plate, pristupljeno 30. svibnja 2023.
- [17] Instrumentation Tools: "Basics of Orifice Plates", s interneta, <https://instrumentationtools.com/orifice-plates>, pristupljeno 30. svibnja 2023.
- [18] Instrumentation Tools: "Venturi Flow Meter Working Principle Animation", s interneta, <https://instrumentationtools.com/venturi-flow-meter-working-principle-animation>, pristupljeno 31. svibnja 2023.
- [19] "Wikipedia", s interneta, https://en.wikipedia.org/wiki/Mass_flow_meter, pristupljeno 2. lipnja 2023.
- [20] Hidroconta: "How does an electromagnetic flowmeter work?", s interneta, <https://hidroconta.com/en/how-does-an-electromagnetic-flowmeter-work>, pristupljeno 4. lipnja 2023.
- [21] OMEGA Engineering: "What is an Ultrasonic Flow Meter?", s interneta, <https://www.omega.com/en-us/resources/ultrasonic-flow-meters>, pristupljeno 15. lipnja 2023.
- [22] OMEGA Engineering: "Doppler Meters Vs Transit Time Ultrasonic Flow Meters", s interneta, <https://www.omega.com/en-us/resources/dif-between-doppler-transit-time-ultrasonic-flow-meters>, pristupljeno 17. lipnja 2023.

- [23] OMEGA Engineering: "Ultrasonic FlowMeter FDT-21", s interneta, <https://assets.omega.com/manuals/M5011.pdf>, pristupljeno 19. lipnja 2023.
- [24] Applied Flow Technology: "AFT Fathom | Fluid Dynamic Simulation Software", s interneta, <https://www.aft.com/products/fathom>, pristupljeno 20. lipnja 2023.
- [25] Fluid Handling: "Flow Measurement In The Food And Beverage Sector", s interneta, <https://fluidhandlingpro.com/product-quality>, pristupljeno 11. svibnja 2023.
- [26] Rhys T.; Sierra D.: "Laminar Flow", s interneta, https://jklymak.github.io/Phy426/lab_demos20/Laminar_Dean_Thomas, pristupljeno 13. svibnja 2023.
- [27] Gigazine: "The world's first lightsaber with plasma as the blade of light is developed", s interneta, https://gigazine.net/gsc_news/en/20201012-4000-plasma-lightsaber, pristupljeno 13. svibnja 2023.
- [28] EngineeringClicks: "Aerodynamics Basics – Know the fundamentals", s interneta, <https://www.engineeringclicks.com/aerodynamics-basics>, pristupljeno 13. svibnja 2023.
- [29] AirShaper: "How to calculate Reynolds number", s interneta, <https://airshaper.com/videos/the-relation-between-turbulence-reynolds-and-wind-tunnel-testing/sV8l8xd4MEQ>, pristupljeno 15. svibnja 2023.
- [30] Milwaukee School of Engineering: "Moody Friction Factor Graph", s interneta, <https://faculty-web.msoe.edu/tritt/be382/MoodyChart.html>, pristupljeno 18. svibnja 2023.
- [31] Neutrium: "PRESSURE LOSS FROM FITTINGS - EXCESS HEAD (K) METHOD", s interneta, https://neutrium-net.translate.goog/fluid-flow/pressure-loss-from-fittings-excess-head-k-method/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=hr&_x_tr_hl=en&_x_tr_pto=wapp, pristupljeno 19. svibnja 2023.
- [32] What is Piping: "Piping Elbows vs Bends for Piping and Plumbing Systems (PDF)", s interneta, <https://whatispiping.com/piping-elbows-and-bends>, pristupljeno 19. svibnja 2023.
- [33] IndiaMART: "Oval Gear Meter", s interneta, <https://www.indiamart.com/proddetail/oval-gear-meter-24276656155.html>, pristupljeno 28. svibnja 2023.
- [34] "Wikipedia", s interneta, https://en.wikipedia.org/wiki/Flow_measurement#/media/File:Caudalimetro_Desplazamiento_PositivoV1.jpg, pristupljeno 28. svibnja 2023.

- [35] EEGGUIDE: "Turbine Flow Meter Working Principle", s interneta, <https://www.eeeguide.com/turbine-flow-meter-working-principle>, pristupljeno 28. svibnja 2023.
- [36] Mechanical Booster: "Turbine Flow Meter Working Principle", s interneta, <https://www.mechanicalbooster.com/2016/06/venturimeter-principle-construction-working-diagram.html>, pristupljeno 31. svibnja 2023.
- [37] „Alibaba“, s interneta, https://www.alibaba.com/product-detail/0-1-Accuracy-Coriolis-Flow-Meter_62209217010.html, pristupljeno 1. lipnja 2023.
- [38] Bronkhorst: "Thermal Mass flow sensor for liquids", s interneta, <https://www.bronkhorst.com/int/service-support-1/technologies/thermal-mass-flow-sensor-for-liquids>, pristupljeno 3. lipnja 2023.
- [39] Assured Automation: "Magnetic Flow Meter Basics", s interneta, <https://assuredautomation.com/news-and-training/magnetic-flow-meter-basics>, pristupljeno 4. lipnja 2023.
- [40] Cleaning Technologies Group: "Ultrasonics – Transducers – Piezoelectric Hardware", s interneta, <https://techblog.ctgclean.com/2012/01/ultrasonics-transducers-piezoelectric-hardware>, pristupljeno 15. lipnja 2023.
- [41] „ResearchGate“, s interneta, https://www.researchgate.net/figure/The-transit-time-ultrasonic-flowmeter-setup_fig1_228899654, pristupljeno 17. lipnja 2023.
- [42] Applied Flow Technology: "AFT Fathom 8...Worth the Wait", s interneta, <https://www.aft.com/blog/aft-fathom-8-worth-the-wait>, pristupljeno 20. lipnja 2023.
- [43] ElectricalWorkbook: "What is Doppler Flow Meter? Working Principle, Construction & Applications", s interneta, <https://electricalworkbook.com/doppler-flow-meter>, pristupljeno 18. lipnja 2023.

SAŽETAK

U ovom završnom radu naslova „Mjerenje protoka fluida cjevovodnom sustavu“ zadatak je bio mjerenje protoka fluida u laboratoriju na Tehničkom fakultetu u Rijeci. U prvom dijelu rada objašnjene su vrste strujanja fluida, gubici pri strujanju te volumetrijski i maseni protok. Nakon toga su iznesene prednosti i nedostaci te način rada nekih od uređaja za mjerenje protoka fluida, posebice ultrazvučnom protokomjeru, vrsti protokomjera koja je korištena u ovom radu. U eksperimentalnom dijelu provedeno je mjerenje protoka vode u zatvorenom krugu sastavljenom od cijevi, pumpi, glavnog ventila, kontrolnog mjernog uređaja te ostalih dijelova. Za mjerenje protoka korišten je ultrazvučni protokomjer FDT-21, pri čemu je korištena W-metoda. Rezultati dobiveni tijekom šest mjerenja prikazani su tablično te su analizirani uz pomoć *Microsoft Excel*-a. Za kraj, izvršena je računalna simulacija cjevovodnog sustava u softveru *AFT Fathom 9*.

Ključne riječi: mjerenje, protok, ultrazvučni protokomjer, cjevovodni sustav, simulacija, eksperiment

ABSTRACT

In this final thesis entitled "Pipeline System Fluid Flow Measurement", the task was to measure the flow of fluid in the laboratory at the Faculty of Engineering in Rijeka. The first part of the thesis explains the types of fluid flow, losses during flow, and volumetric and mass flow. After that, the advantages and disadvantages, as well as the working principle of some of the devices for measuring fluid flow, especially the ultrasonic flowmeter, the type of flowmeter that was used in this thesis, are presented. In the experimental part, the measurement of the water flow was carried out in a closed circuit consisting of pipes, pumps, main valve, control measuring device and other parts. An ultrasonic flowmeter FDT-21 was used to measure the flow, applying the W-method. The results obtained during six measurements are presented in a table and analyzed with the help of *Microsoft Excel*. Finally, a computer simulation of the pipeline system was performed in the *AFT Fathom 9* software.

Key words: measurement, flow, ultrasonic flowmeter, pipeline system, simulation, experiment