

CFD analiza lokalnih otpora unutar zrakovoda

Kusić, Mislav

Master's thesis / Diplomski rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:169:967715>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-03**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET
Diplomski studij Rudarstvo

CFD SIMULACIJA LOKALNIH OTPORA UNUTAR ZRAKOVODA

Diplomski rad

Mislav Kusić

R-242

Zagreb, 2021.



KLASA: 602-04/21-01/15
URBROJ: 251-70-03-21-2
U Zagrebu, 08.02.2021.

Mislav Kusić, student

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju Vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-04/21-01/15, UR. BROJ: 251-70-11-21-1 od 04.02.2021. godine priopćujemo temu diplomskog rada koja glasi:

CFD ANALIZA LOKALNIH OTPORA UNUTAR ZRAKOVODA

Za voditelja ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o diplomskom ispitu doc. dr. sc. Mario Klanfar, docent Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Voditelj

(potpis)

Doc. dr. sc. Mario Klanfar

(titula, ime i prezime)

**Predsjednik povjerenstva za
završne i diplomske ispite**

(potpis)

Doc. dr. sc. Dubravko
Domitrović

(titula, ime i prezime)

**Prodekan za nastavu i
studente**

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Dalibor
Kuhinek

(titula, ime i prezime)

CFD ANALIZA LOKALNIH OTPORA UNUTAR ZRAKOVODA

Mislav Kusić

Rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za rudarstvo i geotehniku
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

Ovim radom elaborira se CFD metoda i njezina praktična primjena. CFD metoda je metoda kojom se računalno simulira utjecaj fluida na određeno tijelo. Kroz rad se razrađuje sama teorija i primjena CFD metode u praksi. Također, u radu se provelo laboratorijsko ispitivanje i sama računalna simulacija. Konkretnije, provela su se dva laboratorijska ispitivanja, direktno mjerenje pada tlaka Pitotovom cijevi i direktno mjerenje brzine strujanja termalnim manometrom. Nakon toga se provela računalna simulacija na ispitivanom segmentu uz početne uvjete koji su uzeti iz laboratorijskog ispitivanja. Na kraju rada su se rezultati dobiveni u laboratoriju i simulaciji usporedili da se vidi postoje li sličnosti ili razlike između rezultata.

Ključne riječi: CFD, simulacija, otpor, zrakovod, ispitivanje, tlak, brzina, protok, OpenFOAM, model, turbulencije.

Završni rad sadrži: **47** stranice, **7** tablica, **34** slike, **0** priloga i **16** referenci.

Jezik izvornika: Hrvatski

Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb

Mentori: Dr. sc. Mario Klanfar, redoviti profesor RGNF

Pomagao pri izradi: Vjekoslav Herceg, asistent RGNF

Ocjenjivači: Dr. sc. Mario Klanfar, redoviti profesor RGNF
Dr. sc. Dubravko Domitrović, redoviti profesor RGNF
Dr. sc. Želimir Veinović, redoviti profesor RGNF

CFD ANALYSIS OF LOCAL RESISTANCES IN AIRWAYS

Mislav Kusić

Thesis completed at: University of Zagreb
Faculty of mining, Geology and Petroleum Engineering
Institute of mining and geotechnics
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Abstract

The CFD method and its practical application is elaborated in this thesis. The CFD method is a method in which a computer simulates the effects of a fluid on a certain type of object. Through the thesis the theory and application of the CFD method are examined. Also, a laboratory experiment and a computer simulation are conducted. To be more specific, two laboratory experiments were conducted, a direct measurement of a drop in pressure by the Pitot tube and a direct measurement of current speed by a thermal manometer. After that, a computer simulation was made on the examined segment with the initial conditions that we got from the laboratory experiment. At the end of the thesis, the results that came from the laboratory experiment and from the computer simulation are compared to see if any similarities or differences exist.

Keywords: CFD, simulation, resistance, airway, test, pressure, velocity, flow, OpenFOAM, model, turbulence.

Thesis contains: **47** pages, **7** tables, **34** figures, **0** appendixes and **16** references.

Original in: Croatian

Archived in: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisors: Assistant professor, Mario Klanfar, PhD

Tech. assistance: Assistant, Vjekoslav Herceg

Reviewers: Assistant professor, Mario Klanfar, PhD
Assistant professor, Dubravko Domitrović, PhD
Assistant professor, Želimir Veinović, PhD

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. TEORIJA MEHANIKE FLUIDA	2
2.1. Mehanika fluida.....	2
2.2. Što je to CFD metoda?.....	3
2.3. Kratka povijest razvoja CFD metode	5
2.4. Područja primjene CFD metode.....	6
2.5. Kako funkcionira CFD metoda?	8
2.6. Zašto nam je CFD analiza bitna?	9
2.7. OpenFOAM	9
2.7.1. Povijest OpenFOAM-a.....	9
2.7.2. Sposobnosti OpenFOAM-a	10
2.7.3. Prednosti i nedostaci OpenFOAM-a	11
3. LABORATORIJSKA ISPITIVANJA	12
3.1. Mjerenje pada tlaka pomoću Pitotove cijevi i digitalnog manometra.....	12
3.1.1. Opis ispitivanja	12
3.1.2. Sustav za ispitivanje.....	15
3.1.3. Profili i rezultati mjerenja na profilima.....	17
3.1.4. Oprema za ispitivanje.....	21
3.1.5. Podaci i formule korišteni za proračun brzine strujanja fluida i protoka fluida kroz ispitivani segment	23
3.1.6. Proračun protoka za profile	24
3.1.7. Opažanja tijekom prvog mjerenja	25
3.2. Direktno mjerenje brzine strujanja fluida pomoću termalnog manometra	26
3.2.1. Opis ispitivanja.....	26
3.2.2. Opažanja tijekom drugog mjerenja	29
3.3. Usporedba rezultata mjerenja Pitotovom cijevi i termalnim manometrom	30
3.3.1. Opažanja razlika između mjerenja Pitotovom cijevi i termalnim manometrom...31	
4. MODELIRANJE TURBULENCIJA ZA CFD ANALIZU	32
4.1. Što su uopće turbulencije?.....	32
4.2. Modeliranje turbulencija	33
5. SIMULACIJA TOKA ZRAKA KROZ ISPITIVANI SEGMENT U OPENFOAM-U.37	
5.1. Opis rada OpenFOAM-a u izradi simulacije.....	37

5.2.	Ilustrirani prikaz rezultata simulacije za raspodjelu brzine strujanja po profilima ..	39
5.2.1.	Usporedba mjerenih rezultata brzine strujanja sa rezultatima iz simulacije	41
5.3.	Ilustrirani prikaz rezultata simulacije za raspodjelu tlakova po profilima	42
5.3.1.	Usporedba mjerenih rezultata tlakova sa rezultatima iz simulacije.....	44
6.	ZAKLJUČAK.....	45
7.	LITERATURA	46

POPIS SLIKA

Slika 2-1 Primjer simulacije toka zraka na turbini	4
Slika 2-2 Primjer raspodjele otpora zraka na bolidu F1.....	6
Slika 2-3 Primjer raspodjele otpora zraka na Airbus avionu.....	7
Slika 3-1 Tok fluida kroz Pitotovu cijev uz pripadajuće jednadžbe za proračun brzine strujanja fluida	13
Slika 3-2 Tok fluida kroz venturijevu cijev.....	14
Slika 3-3 Sustav za laboratorijsko ispitivanje	15
Slika 3-4 Ispitivani segment sustava.....	16
Slika 3-5 Shema ispitivanog segmenta sustava	16
Slika 3-6 Profil (a)	17
Slika 3-7 Profil (b)	18
Slika 3-8 Profil (c)	19
Slika 3-9 Profil (d)	20
Slika 3-10 Ventilator.....	21
Slika 3-11 Karakteristike ventilatora	21
Slika 3-12 Pregrada (d=115 mm)	21
Slika 3-13 Digitalni manometar.....	22
Slika 3-14 Pitotova cijev u ispitivanom segmentu	22
Slika 3-15 Izlaz drugog kraja cijevi u atmosferu.....	23
Slika 3-16 Termalni manometar	26
Slika 3-17 Krilni anemometar	28
Slika 4-1 Prikaz dvaju osnovnih vrsta tokova	32
Slika 5-1 Blok i ispitivani segment.....	37
Slika 5-2 Uzdužni profil mreže na ispitivanom segmentu	38
Slika 5-3 Detalj sa mreže ispitivanog segmenta.....	38
Slika 5-4 Raspodjela brzina strujanja - profil (a).....	39
Slika 5-5 Raspodjela brzina strujanja - profil (b)	39
Slika 5-6 Raspodjela brzina strujanja - profil (c).....	40
Slika 5-7 Raspodjela brzina strujanja - profil (d)	40
Slika 5-8 Raspodjela brzina strujanja po cijelom ispitivanom segmentu	40
Slika 5-9 Raspodjela tlakova - profil (a).....	42
Slika 5-10 Raspodjela tlakova - profil (b).....	42

Slika 5-11 Raspodjela tlakova - profil (c)	43
Slika 5-12 Raspodjela tlakova - profil (d).....	43
Slika 5-13 Raspodjela tlakova po cijelom ispitivanom segmentu	43

POPIS TABLICA

Tablica 3-1 Mjerenje na profilu (a).....	17
Tablica 3-2 Mjerenje na profilu (b)	18
Tablica 3-3 Mjerenje na profilu (c).....	19
Tablica 3-4 Mjerenje na profilu (d)	20
Tablica 3-5 Prikaz rezultata proračuna brzine strujanja fluida po profilima, prosječne brzine strujanja i protoka za svaki profil	24
Tablica 3-6 Prikaz direktno mjerenih brzina strujanja fluida po profilima, proračuna prosječne brzine strujanja i protoka za svaki profil	27
Tablica 3-7 Razlika brzina između mjerenja Pitotovom cijevi i termalnim manometrom ..	30

1. UVOD

U ovom radu nastojala se pobliže pojasniti CFD metoda i primjena iste.

U prvom poglavlju ovog rada su razrađene osnove mehanike fluida i njena povezanost sa CFD metodom.

Računalna dinamika fluida (CFD, od eng. *Computational Fluid Dynamics*) je analiza tokova i prijenosa topline koristeći numeričke metode. Postoje mnogi softveri pomoću kojih se može koristiti ova metoda u prikazu raznih simulacija iz laboratorijskih i terenskih ispitivanja. Mi smo konkretno koristili OpenFOAM program. U ovom radu su se uspoređivali rezultati dobiveni iz laboratorijskih ispitivanja sa rezultatima dobivenim simulacijom na računalu.

Laboratorijsko ispitivanje se sastojalo u tome da se po ispitivanom segmentu zrakovoda obavilo mjerenje pada tlaka pomoću Pitotove cijevi spojene na digitalni manometar i direktno mjerenje brzine strujanja pomoću termalnog manometra.

U računalnoj simulaciji se modelirao model koji je temeljen na početnoj geometriji ispitivanog segmenta i početnih uvjeta. Ta ista simulacija daje rezultate za pad tlaka i brzine strujanja.

Na kraju se usporede rezultati iz laboratorijskog ispitivanja sa rezultatima dobivenim iz računalne simulacije i time se dobije uvid u to koja je metoda moguće bolja ili lošija i iz kojih razloga.

2. TEORIJA MEHANIKE FLUIDA

2.1. Mehanika fluida

Da uopće bi se uopće vidjelo sa kojim problemima i zašto je korisna CFD analiza, početak ovog rada je posvećen prisjećanju kratkih osnova mehanike fluida.

Mehanika fluida je dio fizike koji se bavi gibanjem fluida i silama koje djeluju na fluid. Mehanika fluida se dijeli na statiku fluida koja proučava ravnotežu fluida u stanju mirovanja, kinematiku fluida koja se bavi zakonima gibanja fluida, i dinamiku fluida koja se bavi silama koje djeluju na fluid i gibanjima koja nastaju djelovanjem tih sila te interakcijom između čvrstih tijela i fluida.

Kao takva (GIRALDO, 2020), povezana je sa silama koje djeluju na fluide i sa posljedičnim promjenama kvantitativnih svojstava tih fluida: pritisak, brzina strujanja, gustoća i temperatura. Te relacije su matematički izražene kroz diferencijalne jednačbe, Navier-Stokes jednačbe koje su nužne za razumijevanje zakona kojima su podložni viskozni fluidi.

S druge strane (GIRALDO, 2020), jedna od pojava koju proučava mehanika fluida je prijenos topline, tj. kako se termalna energija stvara, „skladišti“, transportira i kako prelazi iz jednog oblika u drugi. Glavni mehanizmi koji se proučavaju su:

- **Kondukcija:** Širenje topline kroz materijale koji su čvrsti ili fluidi, iz područja visoke temperature u područje niže temperature (isti princip kao kod difuzije).
- **Konvekcija:** Transport topline u obliku toka fluida. Tok fluida može biti vođen vanjskom silom (prisiljena konvekcija) ili uzgonom, što je kretanje fluida kojemu se gustoća mijenja u prisutnosti gravitacije (prirodna konvekcija).
- **Radijacija:** Stvaranje i absorpcija topline kroz elektromagnetne valove.
- **Promjena faze:** Otpuštanje ili absorpcija topline kroz tranzicije kao što su vrenje, otapanje, kondenzacija, itd.

Najopćenitiji zakoni za tok fluida su setovi Navier-Stokes jednačbi koje su navedene na sljedećoj stranici pod brojevima (1-1), (1-2) i (1-3) u svojem osnovnom vektorskom obliku.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla * (\rho u) = 0 \quad (1-1)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + u * \nabla(\rho u) = \nabla * \sigma + \rho f \quad (1-2)$$

$$\frac{\partial E_t}{\partial t} + \nabla * (E_t u) = \nabla * \sigma u - \nabla * q \quad (1-3)$$

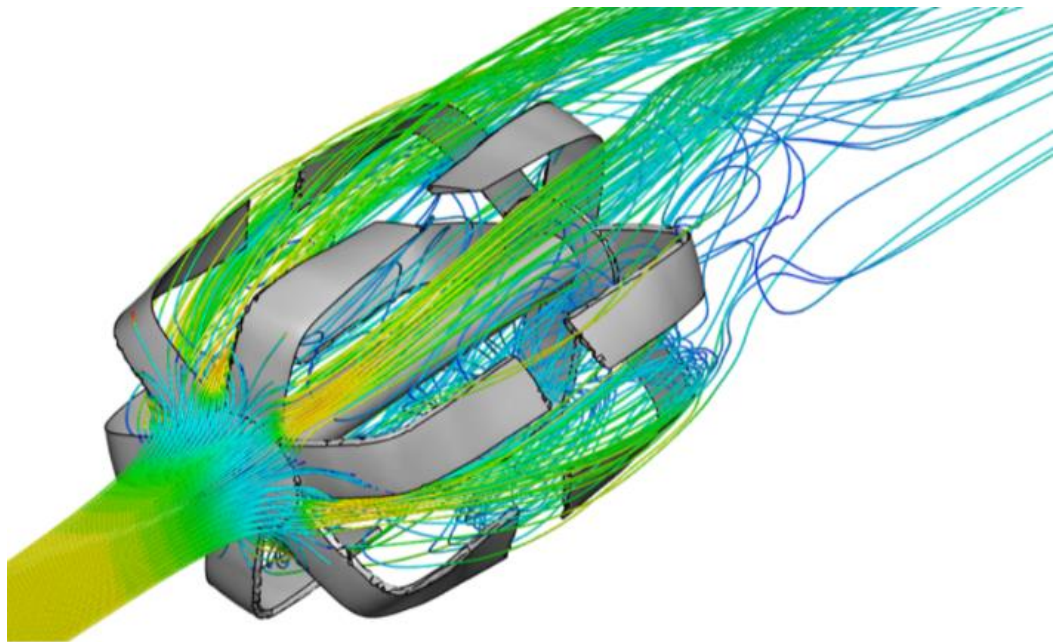
gdje su: ρ – gustoća (kg/m³)
 t – vrijeme (s)
 ∇ – divergencija
 u – brzina strujanja (m/s)
 f – bilo koja druga sila koja djeluje na fluid (npr. gravitacija) (N)
 E_t – ukupna energija (J)
 σ – normalno naprezanje (Pa)
 q – prijenos topline

Ipak zbog njihove kompleksnosti, rješavanje ovih jednadžbi očekujući točno određena rješenja se može postići samo za najjednostavnije primjere. Zato tu sad u igru ulazi, za rješavanje tih kompleksnijih problema, CFD analiza, tj. kompjuterske simulacije za takve kompleksne modele.

2.2. Što je to CFD metoda?

Računalna dinamika fluida (CFD, od eng. *Computational Fluid Dynamics*) (FEMTO, 2017) je analiza tokova fluida i prijenosa topline koristeći numeričke metode. Koristeći CFD analizu, možemo analizirati kompleksne probleme koji uključuju interakcije fluida (tekućine) sa fluidom (tekućinom), fluida (tekućinom) sa čvrstom tvari i fluida (tekućinom) sa fluidom (plinom). Polja inženjeringa gdje se CFD analiza često koristi su aerodinamika i hidrodinamika, gdje se kvantitativne veličine poput sile uzgona i otpora sredstva ili svojstva poput pritiska i brzina pokušavaju otkriti. Dinamika fluida je uključena u zakone fizike u obliku parcijalnih diferencijalnih jednadžbi. Sofisticirani CFD solveri pretvaraju te zakone u algebarske jednadžbe i u mogućnosti su efektivno riješiti te jednadžbe numeričkim metodama. CFD analize imaju veliki potencijal da uštede vrijeme projektiranja i zbog toga su jeftinije i brže u usporedbi sa konvencionalnim metodama prikupljanja podataka za ovakve analize.

Osim toga, u svakodnevnim ispitivanjima može se mjeriti samo određen broj podataka, dok se u CFD analizi sve željene veličine i podaci mogu mjeriti odjednom i to u visokoj rezoluciji vremena i prostora. Iz razloga što CFD analize daju približna rješenja samome problemu, trebamo biti svjesni toga da te analize ne mogu zamijeniti testiranja u labosu i na terenu. Zbog sigurne potvrde podataka testiranja i simulacije se svejedno trebaju provesti. Na slici 2-1 vidimo tipičan primjer CFD simulacije toka zraka na turbini.



Slika 2-1 Primjer simulacije toka zraka na turbini (GIRALDO, 2020)

2.3. Kratka povijest razvoja CFD metode

U ovom poglavlju se nalazi kronološki slijed razvoja CFD metode kroz povijest (CRAHMALIUC, 2020):

- 1922 – Osnove moderne CFD i numeričke meteorologije, ustanovio Lewis Fry Richardson u shemi vremenske prognoze koristeći metode konačne razlike.
- 1933 – Najranije numeričko rješenje za tok fluida kroz cilindar, ustanovio A. Thom.
- 1950 – Prva vremenska prognoza za sljedeća 24 sata izvedena pomoću ENIAC modernog računala.
- 1955 – Simulacija metodom čestica za privremeni 2D tok fluida, razvio *Los Alamos National Laboratory*.
- 1963 – Funkcija vrtloženja i toka kao metoda za 2D, privremeni, nestlačivi tok fluida.
- 1965 – Metoda markera i ćelija za viskozni tok u ovisnosti o vremenu, razvio *Los Alamos National Laboratory*.
- 1966 – Metoda fluida i ćelija razvijena za probleme nestabilnog, stlačivog toka fluida.
- 1967 – Prvi 3D model razvijen, temeljen na diskretizaciji panela, objavio *Douglas Aircraft*.
- 1968 – Prvi panel kod za uzgon (A230), objavio *Boeing Aircraft*.
- 1970 – Prvi opis jednadžbi potencijalnog protoka, objavio *Boeing Aircraft*.
- 1981 – 3D FLO57 kod temeljen na Euler-ovim jednadžbama za nadzvučni tok.
- Nakon 1981 – Mnogo osnovnih dijelova istraživanja koja su dovela do razvoja CFD 2D i 3D metoda su bila usredotočena na dizajn i analizu aeroprofila krila, istraživanja u NASA-i usredotočena na razvoj 2D, ARC2D i 3D kodova za rješavanje Navier-Stokes jednadžbi, ti kodovi su uključivali AR3D, OWEFLOW i CFL3D, koji su bili glavni izvori za moderne komercijalne CFD pakete koji su pokrivali osnove CFD analize.

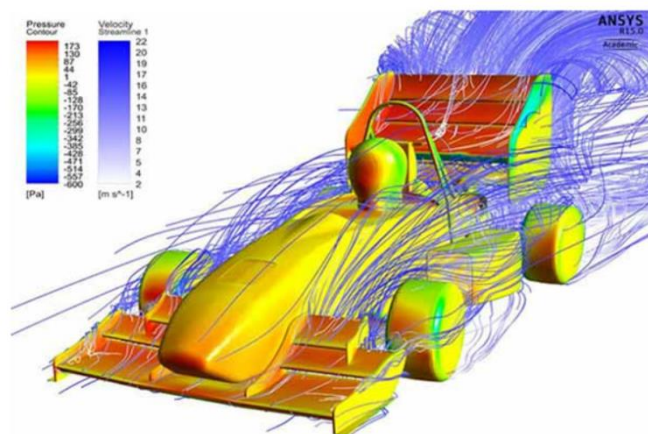
2.4. Područja primjene CFD metode

Grane industrije u kojima se CFD metoda široko koristi uključuju (SIEMENS, 2020b):

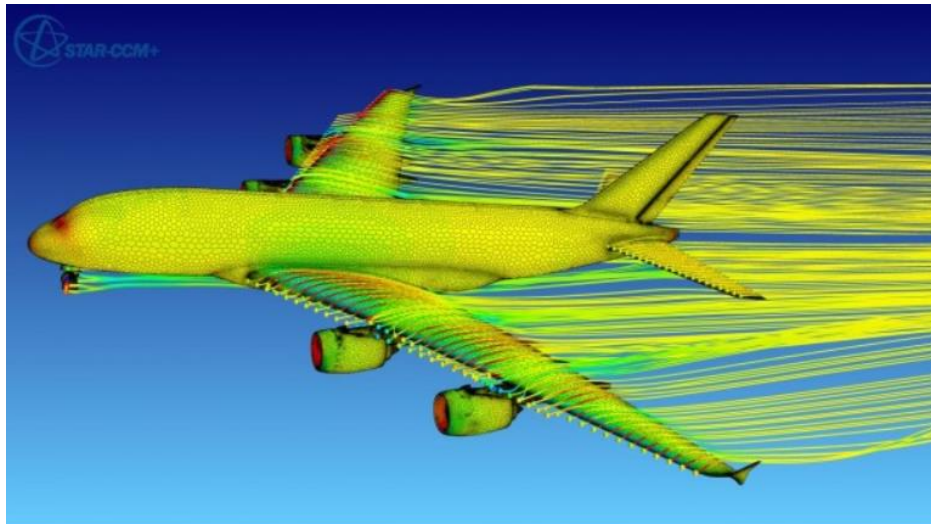
- Zrakoplovna industrija
- Automobilna industrija
- Kemijska industrija
- Brodogradnja (dizajn brodova, pogonski sustavi, dizajn motora)
- Elektronika
- Energija (nuklearna, nafta i plin, proizvodnja energije)
- Građevinske tvrtke
- Prirodoslovne znanosti (meteorologija, ekologija, medicina)
- Ostale općenite primjene u kojima je uključen tok fluida i prijenos topline.

Neki jednostavniji životni primjeri u kojima možemo vidjeti primjenu CFD metode, i koji bi danas možda bila nezamislivi bez iste su (CRAHMALIUC, 2020):

- Primjena u vremenskoj prognozi i upozorenja o mogućim prirodnim katastrofama.
- Poboljšanje aerodinamičkih svojstava kod velike količine vozila (primarno automobili i zrakoplovi), npr. analizom djelovanja otpora zraka na vozilo kao što je vidljivo na slici 2-2 za bolid formule 1 i na slici 2-3 za Airbus avion.
- Arhitekti mogu projektirati okoliše i građevine za siguran život i uštedu energije.
- Naftni inženjeri mogu projektirati i održavati optimalne cjevovode.
- Liječnici mogu spriječiti i izliječiti bolesti krvožilnog sustava pomoću računske hemodinamike.



Slika 2-2 Primjer raspodjele otpora zraka na bolidu F1 (WASSERMAN, 2018)



Slika 2-3 Primjer raspodjele otpora zraka na Airbus avionu (SIEMENS, 2020a)

Specifičniji primjeri korištenja CFD metode uključuju (GIRALDO, 2020):

- Analiza toka fluida kroz cijevi ili dodatnu opremu kao što su ventili, t-spojevi i reduktori, da bi se predvidjeli padovi tlaka, padovi brzine i formiranje vrtloga (vrtloženje).
- Analiza aerodinamike vozila, uključujući automobile i zrakoplove, da bi se predvidjeli otpor sredstva, uzgon i aerodinamički potisak.
- Inženjering u građevini prilikom prikupljanja podataka o utjecaju vjetra na građevine, tj. predviđanje sila vjetra, formacije vrtloga (vrtloženje) i ugođaja građanima.
- Projektiranje HVAC (od eng. *Heat, Ventilation and Air Conditioning*) sustava, da bi se procjenila izvedba kanala ili optimizirao termalni komfor za umjetnu ili prirodnu ventilaciju i za potrošnju energije.
- Projektiranje izmjenjivača topline, da bi se procijenio prijenos topline i pad tlaka.
- Hlađenje elektronike, da bi se predvidjele prirodne i prisilne izvedbe hlađenja.
- Projektiranje vjetrenjača; nagib lopatice, brzina i proizvodnja energije pri određenim brzinama vjetra.
- Kontrola disperzije čestica od polucije, kontrola kontaminacije u zraku.
- Projektiranje brodskih i podmorskih konstrukcija.

2.5. Kako funkcionira CFD metoda?

CFD metoda (GIRALDO, 2020) koristi numeričke pretpostavke, pretvarajući diferencijalne jednačbe u sustave linearnih jednačbi, koje su onda riješene da bi se dobile veličine kao što su brzina, pritisak i temperatura na konačnom (često velikom) broju točaka koje se nalaze u domeni samog problema.

Kako bi razumjeli kako CFD modeliranje i analiza funkcioniraju, ovdje se nalazi popis tipičnih karakteristika koje opisuju problem za CFD analizu:

- Problem je definiran zatvorenom geometrijom, koji se referira kao “domena” zatvorena svojim granicama.
- Fenomen koji želimo simulirati je definiran uvjetima, kao što su prisutstvo prijenosa topline, turbulentni ili laminarni tok, postoje li kemijske reakcije, postoji li više faza, postoji li više tijela, itd., sa poznatim svojstvima materijala i koeficijentima za jednačbe stanja.
- Početni uvjeti, isto kao i vrijednosti na granicama polja, su poznate. Ovo može uključivati pritiske, brzine strujanja, zidove, temperature, izvore topline, itd.
- Geometrija domene je podijeljena u malene osnovne oblike koji se nazivaju ćelijama. Set ćelija se zove mreža (*mesh*). Veličina ćelija determinira preciznost rješenja (što su manje to je bolje; slično kao i broj piksela na televizoru, što ih je više i što su manji, slika je čišća), ali broj korištenih ćelija definira zahtjev memorije u računalu (što su ćelije manje, to ih je više, i to je potrebno više memorije u računalu, i time proces rješavanja problema traje duže).

CFD analiza (FEMTO, 2017) se u suštini sastoji od sljedeće tri faze:

1) Pred-obrada podataka:

- U ovoj fazi problem se transformira u idealizirani i diskretizirani računalni model.
- Postavljaju se pretpostavke oko vrste toka koji će se modelirati (viskozni/neviskozni, stlačivi/nestlačivi, stacionaran/nestacionaran).
- Ostali procesi uključuju stvaranje mreže i primjenu početnih i rubnih uvjeta.

2) Rješavanje problema:

- Proračune rješava *solver*, dostupno je više *solver-a*, koji variraju u efektivnosti i kapacitetu rješavanja određenih fizikalnih fenomena.

3) Post-obrađa podataka:

- Naposljetku, rezultati koje smo dobili se vizualiziraju i analiziraju u posljednoj fazi.
- U ovoj fazi analizator verificira rezultate i zaključci se mogu izvući na temelju istih rezultata.
- Načini na koje se prikazuju rezultati su naprimjer statične ili pokretne slike, dijagrami ili tablice.

2.6. Zašto nam je CFD analiza bitna?

Kako ciklusi proizvodnje (GIRALDO, 2020) postaju sve kraći, i kako sve više i više proizvoda traži što veću preciznost po pitanju performansi da bi postigli uspješnost, numerička *online* simulacija dobiva na sve većoj relevantnosti. Mogućnost predviđanja preciznih rezultata uz brzi, vjerodostojni i lagani rad omogućava optimizaciju odmah sa radnog stola, i prije nego što se izradi prvi prototip.

CFD simulacija nije iznimka ovom trendu, i uz online simulacije koje nudi naprimjer SimScale koji donosi mnogo računalne moći i optimalnog radnog toka uz prihvatljive cijene, bez potrebe za instalacijama kompliciranog CFD hardvera i softvera, ove prednosti su unutar dohvata mnogim tvrtkama, čak i onima koje nemaju veliki budžet.

2.7. OpenFOAM

2.7.1. Povijest OpenFOAM-a

OpenFOAM (izvorno, FOAM) (CFD DIRECT, 2021a) stvorio je Henry Weller 1989. godine pod imenom "FOAM" u svrhu razvijanja moćnije i fleksibilnije simulacijske platforme od tadašnje standardne, FORTRAN.

Godine 2004. Henry Weller, Chris Greenshields i Mattijs Janssens osnivaju OpenCFD Ltd kako bi razvili i distribuirali OpenFOAM. Od tada, OpenFOAM se i dalje održava i razvija te svake godine izlazi nova verzija u javnost.

8.kolovoza 2011. OpenCFD kupila je tvrtka Silicon Graphics International (SGI) sa planom da ponude verziju potpuno integriranog CFD rješenja u kojem sav hardver i softver radi zajedno. Istovremeno, autorsko pravo OpenFOAM-a prebačeno je na OpenFOAM Foundation, novoosnovanu, neprofitnu organizaciju koja upravlja OpenFOAM-om i distribuira ga široj javnosti pod GPL licencom.

12. rujna 2012 ESI Group objavljuje da kupuje OpenCFD Ltd od SGI-a. Weller i Greenshields 2014. napuštaju ESI Group i nastavljaju razvoj i upravljanje OpenFOAM-om preko OpenFOAM Foundation, na CFD Direct-u. CFD Direct nastavio je razvoj distribucije poznat kao OpenFOAM, dok ESI Group sada samostalno razvija OpenFOAM-plus.

2.7.2. Sposobnosti OpenFOAM-a

OpenFOAM mehanizmi (CFD DIRECT, 2021b) rješavanja uključuju:

- osnovne CFD solvere
- direktne numeričke simulacije (DNS) koje rješavaju puni raspon trubulentnih skala
- simulacije velikih vrtloga (LES)
- RANS (*Reynolds-averaged Navier-Stokes*) i LES (*Large eddy simulation*) pristup modeliranju stlačivog strujanja
- RANS (*Reynolds-averaged Navier-Stokes*) i LES (*Large eddy simulation*) pristup modeliranju nestlačivog strujanja
- modeliranje višefaznih strujanja
- modeliranje jednofaznih strujanja
- metoda praćenja čestica
- rješavanje problema procesa izgaranja
- simulacije molekularne dinamike
- Monte Carlo simulacije
- modeli izmjene topline.

Osim standardnih solvera, OpenFOAM sintaksa omogućuje jednostavno kreiranje prilagođenih solvera.

OpenFOAM alati (WIKIPEDIJA, 2020) podjeljeni su u sljedeće grupe:

- Alati za rad s mežama:
 - Generiranje mreža: generiraju računalne rešetke počevši od ulazne datoteke (*blockMesh*) ili iz generičke geometrije navedene kao STL datoteka, koja je automatski povezana s hex-dominantnim rešetkama (*snappyHexMesh*).
 - Pretvorba mreže: oni pretvaraju rešetke generirane drugim alatom u OpenFOAM format.
 - Manipulacija mrežom: obavljaju specifične operacije na mreži, kao što su lokalno usavršavanje, definiranje područja i druge.
- Usluge paralelne obrade: oni pružaju alate za rastavljanje, rekonstrukciju i ponovnu distribuciju računalnog slučaja za obavljanje paralelnih izračuna.
- Pred-procesni alati: alati za pripremu simulacijskih slučajeva.
- Post-procesni alati: alati za obradu rezultata simulacijskih slučajeva, uključujući dodatak za sučelje OpenFOAM i ParaView.

Kako bi se mogli riješiti sustavi parcijalnih diferencijalnih jednačbi, u OpenFOAM-u primjenjuju se sljedeće sheme diskretizacije koje su implementirane u C ++ programsku biblioteku:

- metoda konačnih volumena
- metoda konačnih elemenata i
- metoda konačnih površina (*Finite Area*).

2.7.3. Prednosti i nedostaci OpenFOAM-a (WIKIPEDIJA, 2020)

Prednosti OpenFOAM-a su jednostavna sintaksa za parcijalne diferencijalne jednačbe, potpuno dokumentirani izvorni kod, širok raspon primjena i modela spremnih za upotrebu, komercijalna podrška i obuka koju pružaju programeri, nemaju troškove licenciranja.

Nedostaci OpenFOAM-a su da razvojna zajednica pati od fragmentacije, što dovodi do velikog broja loših projekata, nedostatak integriranog grafičkog korisničkog sučelja (dostupne samostalne open-source opcije), vodič za programere nije dovoljno detaljan zbog čega je učenje dugotrajno kada je potrebno napisati novi program ili dodati funkcionalnost.

3. LABORATORIJSKA ISPITIVANJA

3.1. Mjerenje pada tlaka pomoću Pitotove cijevi i digitalnog manometra

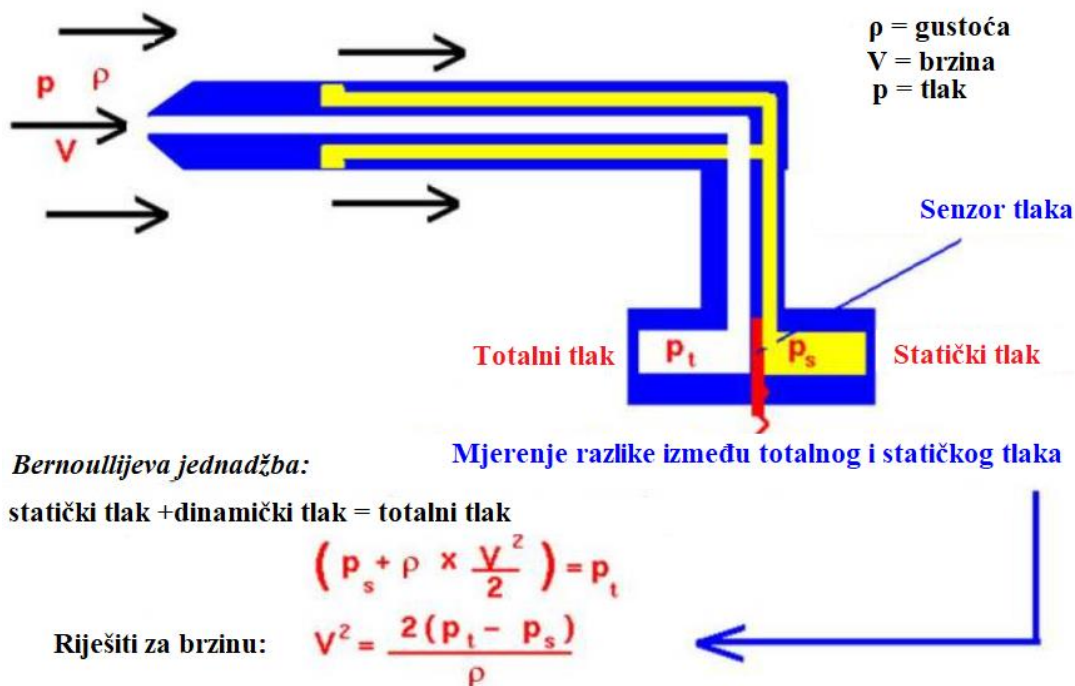
3.1.1. Opis ispitivanja

Sljedeće ispitivanje se provodilo u svrhu shvaćanja utjecaja lokalnog otpora (pregrada promjera 115 mm kao što je vidljivo na slici 3-12) na promjenu statičkog tlaka, totalnog tlaka, brzine strujanja zraka i protoka zraka unutar zrakovoda. Zrakovodni sustav na kojem se obavljalo mjerenje prikazan je na slici 3-3. Ispitivani segment zrakovoda na kojem se provodilo ispitivanja prikazan je na slici 3-4, a pojednostavljena shema sa svim mjerama prikazana je na slici 3-5.

Oprema za samo ispitivanje je uključivala prethodno spomenuti sustav i segment za ispitivanje, ventilator prikazan na slici 3-10 (uz pripadajuće karakteristike prikazane na slici 3-11), pregrada prikazana na slici 3-12, digitalni manometar prikazan na slici 3-13 i Pitotova cijev unutar ispitivanog segmenta prikazana na slici 3-14 i drugim krajem sa izlazom u atmosferu prikazanim na slici 3-15.

Ispitivanje se provelo tako da su se prethodno odredile točke po profilima na kojima će se obaviti mjerenja pomoću Pitotove cijevi.

Pitotova cijev (HALL, 2015), koja se također zove Prandtlova cijev, se najčešće koristi na zrakoplovima kao mjerač brzine. Sama cijev na zrakoplovu je oko 10 inčeva (25,4 centimetara) dugačka i promjera oko $\frac{1}{2}$ inča (1,27 centimetar). Nekoliko manjih rupica je probušeno oko cijevi te je središnja rupa probušena kroz os cijevi. Vanjske rupe su povezane na jednu stranu uređaja koji se zove senzor tlaka. Središnja rupa u cijevi je odvojena od vanjskih rupica i povezana je na drugu stranu senzora tlaka. Senzor tlaka mjeri razliku tlaka između dviju grupa cijevi tako da mjeri naprezanje u tankom elementu koristeći elektronski mjerač naprezanja. Pitotova cijev je ugrađena na zrakoplov, ili u vjetreni tunel, tako da je središnja cijev uvijek usmjerena u smjeru toka fluida, a vanjske rupice su uvijek okomite na središnju cijev. Na nekim zrakoplovima Pitotova cijev je postavljena na duži krak koji strši iz nosa ili krila zrakoplova. Na slici 3-1 je prikazan tok fluida kroz Pitotovu cijev uz pripadajuće jednadžbe za proračun brzine strujanja fluida.

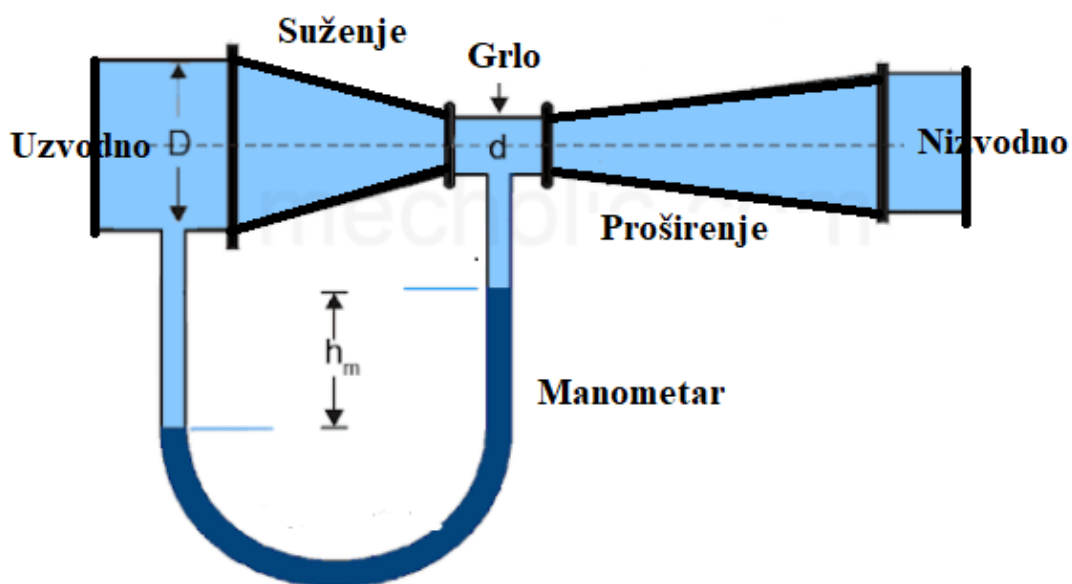


Slika 3-1 Tok fluida kroz Pitotovu cijev uz pripadajuće jednačbe za proračun brzine strujanja fluida (HALL, 2015)

Zanimljivo je da postavljanjem pregrade unutar ispitivanog segmenta dolazi i do pojave Venturijevog efekta. Postavljanjem pregrade se sužava profil kroz koji prolazi zrak. **Venturijev efekt** (FAIRCLOUGH, 2015) je stanje u kojem uz konstantnu mehaničku energiju, tj. tok fluida u sustavu, brzina fluida koji prolazi kroz određeno suženje u sustavu povećava, a statički tlak snizuje.

Time dolazimo i do pojma Venturijeve cijevi.

Venturijeva cijev (BROZOVIĆ i dr., 1999) je uređaj za mjerenje brzine strujanja fluida. Prema Bernoullijevoj jednačbi, ukupni tlak u fluidu (tekućini ili plinu) u gibanju to je manji što je brzina strujanja veća. Obrnuto, iz poznavanja razlike tlaka u mirnom fluidu i fluidu koji struji može se izračunati brzina strujanja, odnosno brzina objekta koji je to strujanje izazvao. Na tom se načelu temelji Venturijeva cijev. U širem dijelu posude fluid struji sporije nego u uskom dijelu pa je u širem dijelu tlak veći. Venturijeva cijev služi za određivanje brzine zrakoplova i mjerenja u zračnim tunelima. Na slici 3-2 je prikazan tok fluida kroz Venturijevu cijev.



Slika 3-2 Tok fluida kroz venturijevu cijev (MURTHI, 2018)

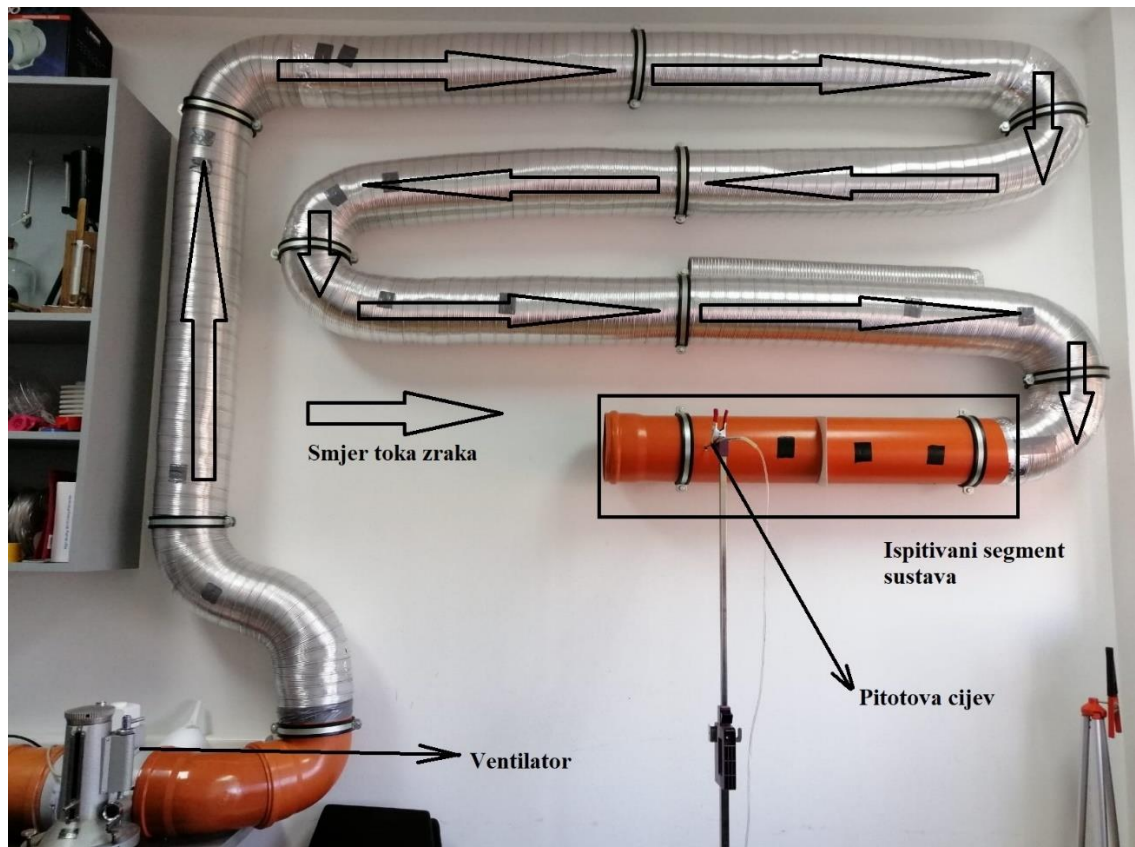
Tlak u dijelu cijevi promjera D je viši nego u dijelu cijevi promjera d , a brzina fluida u dijelu cijevi promjera D je niža nego u dijelu cijevi promjera d , jer je poprečni presjek u dijelu cijevi promjera D veći nego u djelu cijevi promjera d .

Iako suženje na našem ispitivanom segmentu nije toliko dugačko kao na slici 3-2, opet dolazi do pojave Venturijevog efekta, makar je to suženje znatno kraće (svega nekoliko milimetara).

Shema mjerenja prikazana je slikama 3-6, 3-7, 3-8 i 3-9. Pitotova cijevi se jednim krajem priključi na digitalni manometar, a drugi kraj ima izlaz u atmosferu. Potom se uključi ventilator na zadani protok, Pitotova cijev se montira pomoću tronošca na ispitivani segment da bude u što bolje fiksiranom položaju i premješta se po predefinisanim točkama na kojima se mjeri statički i totalni tlak zraka unutar zrakovoda. Tom metodom se dobiju rezultati prikazani u tablicama 3-1, 3-2, 3-3 i 3-4.

3.1.2. Sustav za ispitivanje

Na slici 3-3 se nalazi sustav u kojem se provelo mjerenje sa Pitotovom cijevi.

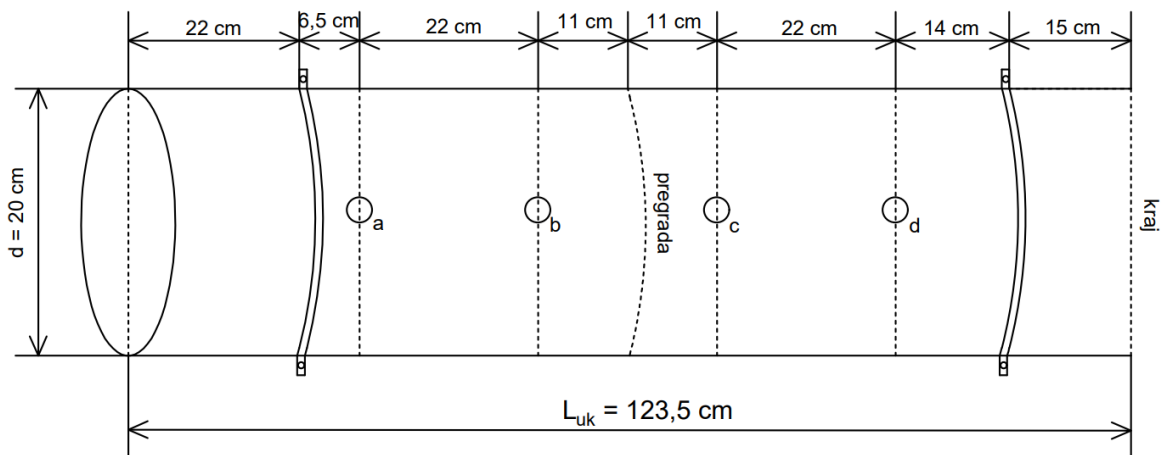


Slika 3-3 Sustav za laboratorijsko ispitivanje

Na slici 3-4 nalazi se ispitivani segment sustava na kojem se provodilo ispitivanje, a na slici 3-5 se nalazi pojednostavljena shema istog segmenta.



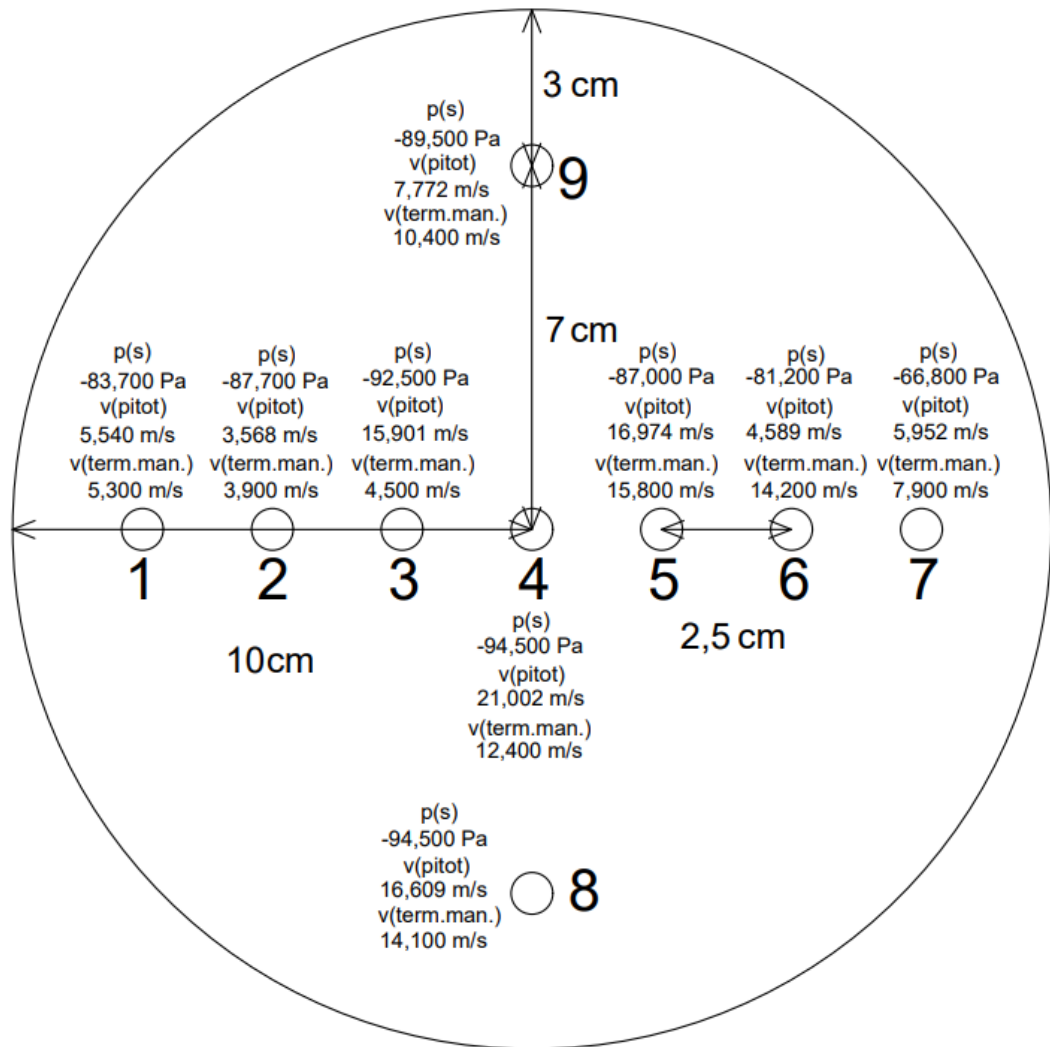
Slika 3-4 Ispitivani segment sustava



Slika 3-5 Shema ispitivanog segmenta sustava

Na slikama 3-6, 3-7, 3-8 i 3-9 su prikazani profili sa shemama mjerenja tlaka Pitovom cijevi po predefiniranim točkama. Uz te slike su prikazane pripadajuće tablice 3-1, 3-2, 3-3 i 3-4 sa mjerenjima koja odgovaraju pripadajućim profilima.

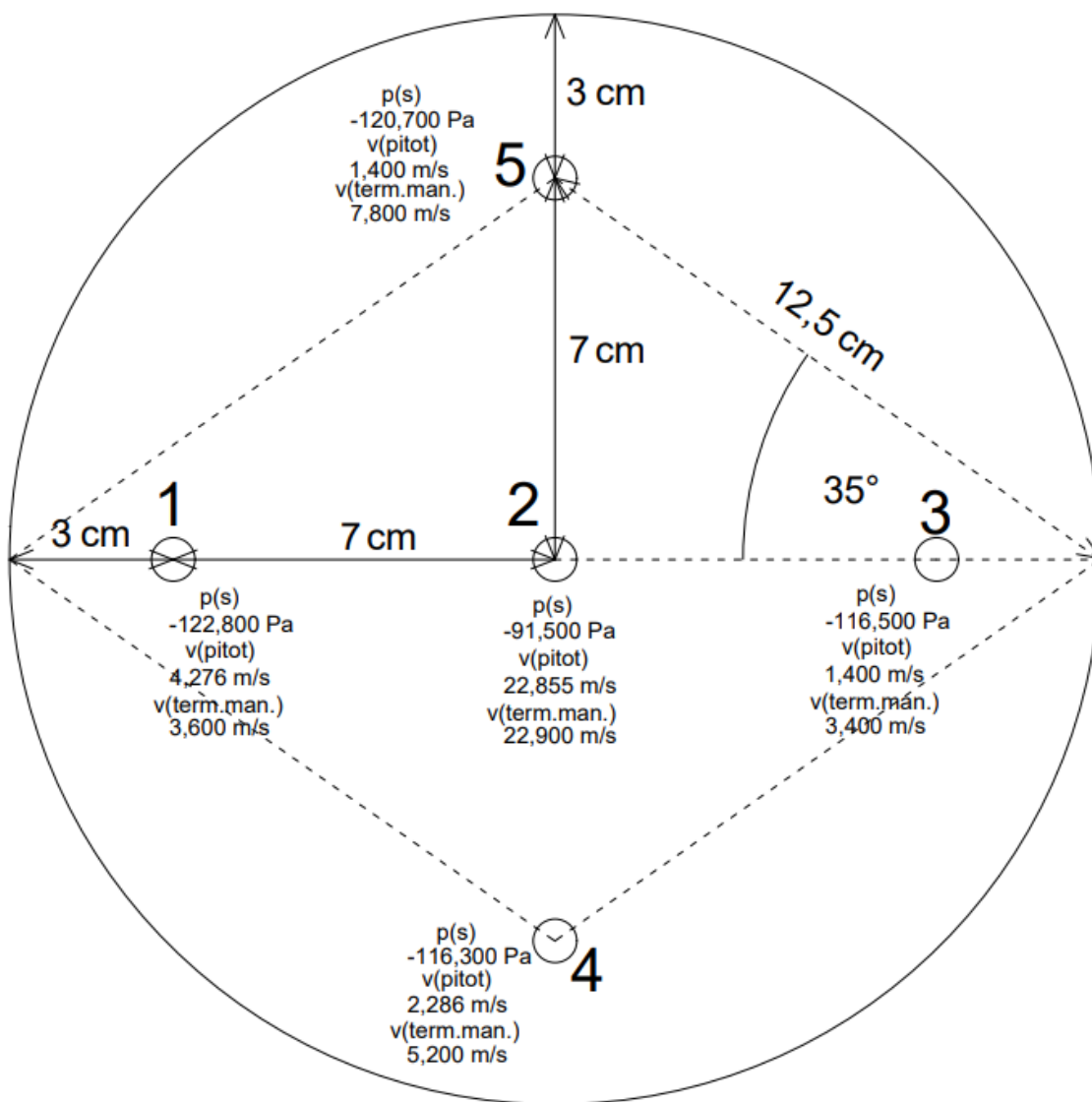
3.1.3. Profili i rezultati mjerenja na profilima



Slika 3-6 Profil (a)

Tablica 3-1 Mjerenje na profilu (a)

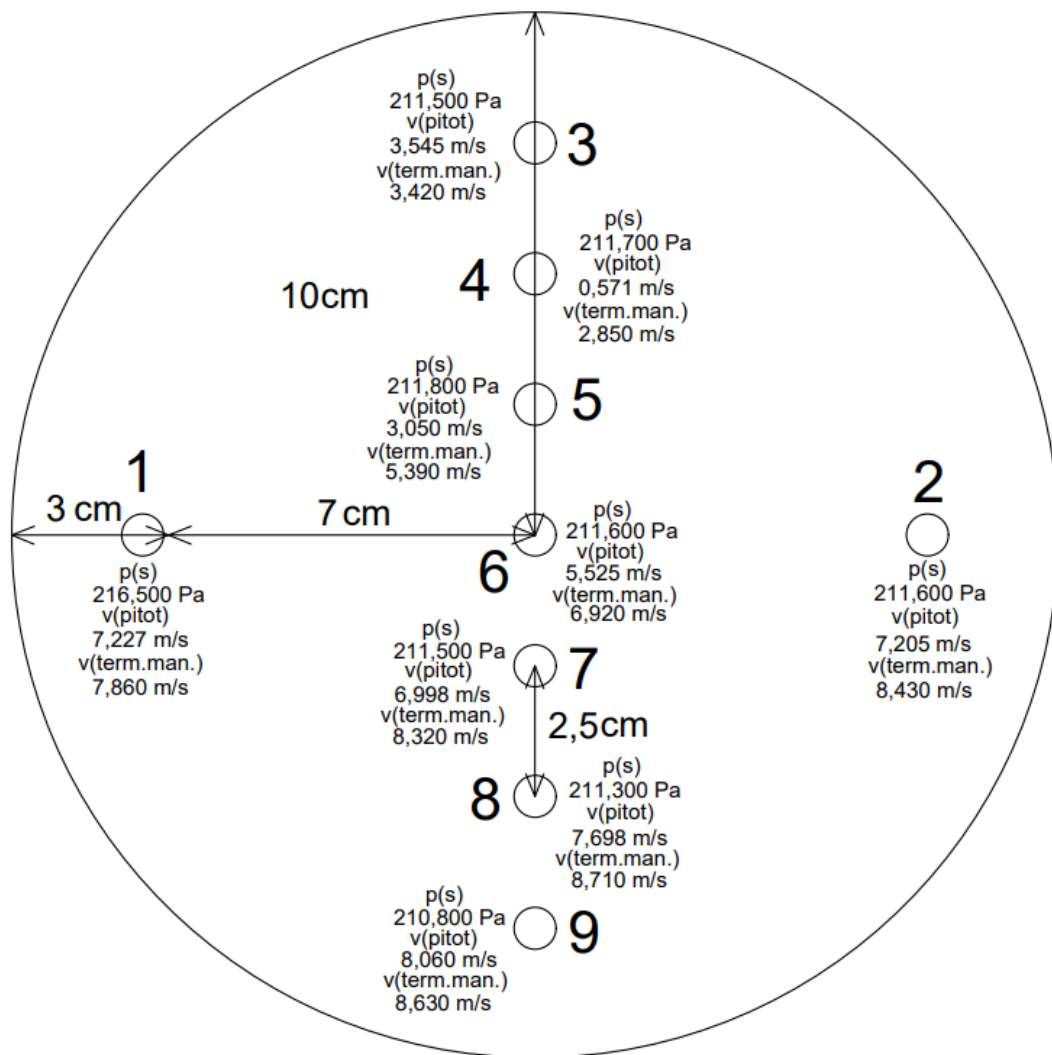
Mjerenje	Statički tlak (Pa)	Totalni tlak (Pa)
1	-83,7	-102,5
2	-87,7	-95,5
3	-92,5	62,4
4	-94,5	175,7
5	-87,0	89,5
6	-81,2	-68,3
7	-66,8	-88,5
8	-94,5	74,5
9	-89,5	-52,5



Slika 3-7 Profil (b)

Tablica 3-2 Mjerenje na profilu (b)

Mjerenje	Statički tlak (Pa)	Totalni tlak (Pa)
1	-122,8	-111,6
2	-91,5	228,5
3	-116,5	-115,3
4	-116,3	-119,5
5	-120,7	-119,5



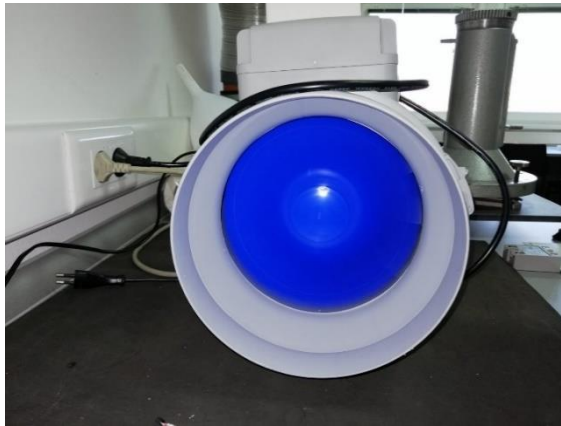
Slika 3-9 Profil (d)

Tablica 3-4 Mjerenje na profilu (d)

Mjerenje	Statički tlak (Pa)	Totalni tlak (Pa)
1	216,5	248,5
2	211,6	243,4
3	211,5	203,8
4	211,7	211,5
5	211,8	217,5
6	211,6	230,3
7	211,5	241,5
8	211,3	247,6
9	210,8	250,6

3.1.4. Oprema za ispitivanje

Na slikama 3-10, 3-12, 3-13 i 3-14 se nalazi oprema za ispitivanje koja je već prethodno navedena na stranici 11 ovog rada. Na slici 3-11 nalaze se karakteristike ventilatora, a na slici 3-15 se nalazi drugi kraj Pitotove cijevi koji izlazi u atmosferu.



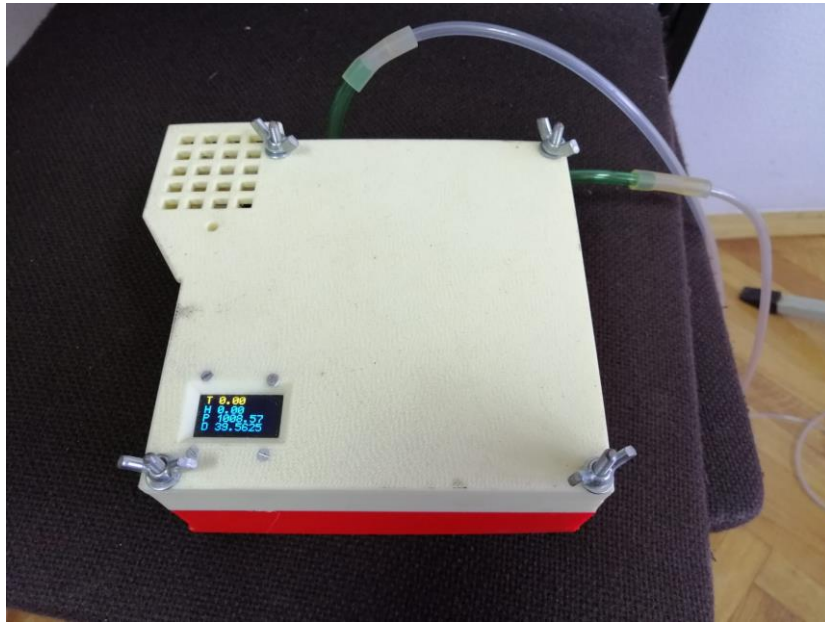
Slika 3-10 Ventilator



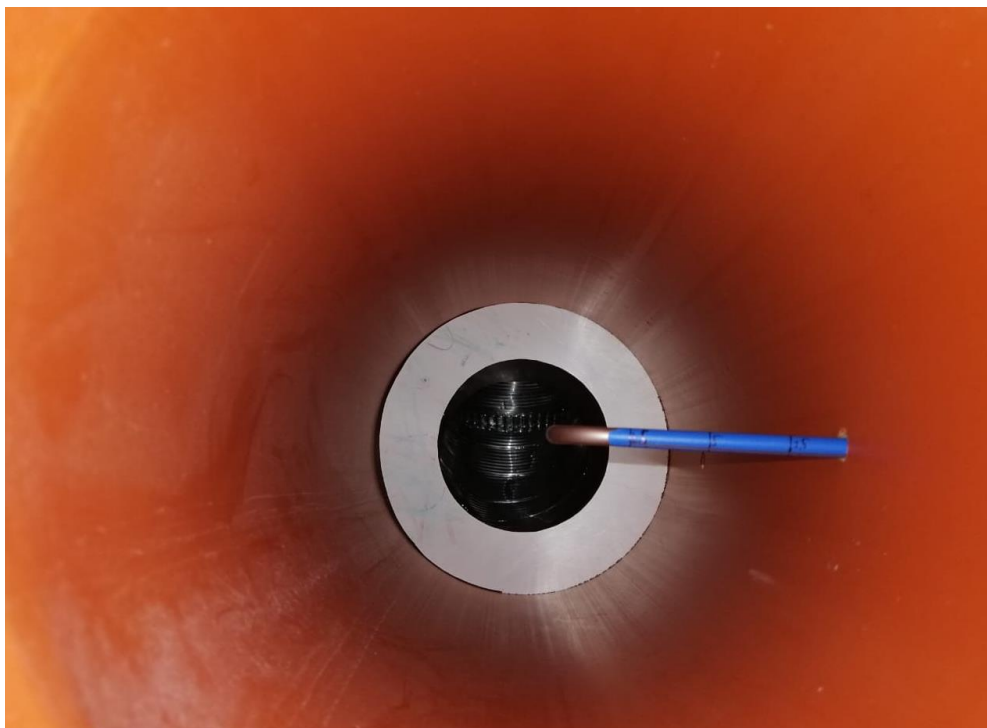
Slika 3-11 Karakteristike ventilatora



Slika 3-12 Pregrada (d=115 mm)



Slika 3-13 Digitalni manometar



Slika 3-14 Pitotova cijev u ispitivom segmentu



Slika 3-15 Izlaz drugog kraja cijevi u atmosferu

3.1.5. Podaci i formule korišteni za proračun brzine strujanja fluida i protoka fluida kroz ispitivani segment

Formule koje su korištene za proračun promjene brzine strujanja i protoka:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot (p_t - p_s)}{\rho}} \text{ – formula za proračun brzine strujanja fluida kroz ispitivani segment} \quad (2-1)$$

$$A = r^2 \cdot \pi \text{ – formula za proračun površine profila ispitivanog segmenta} \quad (2-2)$$

$$Q = v \cdot A \text{ – formula za proračun protoka fluida kroz ispitivani segment} \quad (2-3)$$

gdje su: $\rho_{zrak} = 1,22521 \text{ kg/m}^3$ – standardna gustoća zraka pri temperaturi od 15°C i tlaku od 1013,25 hPa

$r = 0,1 \text{ m}$ – radijus profila ispitivanog segmenta

$A = 0,0314 \text{ m}^2$ – površina profila

p_t – vrijednost totalnog tlaka za svaku pripadajuću točku na profilu (Pa)

p_s – vrijednost statičkog tlaka za svaku pripadajuću točku na profilu (Pa)

$\pi \approx 3,14$ – matematička konstanta

U tablici 3-5 nalazi se prikaz rezultata promjene brzine strujanja i protoka po profilima sa Pitotovom cijevi.

Tablica 3-5 Prikaz rezultata proračuna brzine strujanja fluida po profilima, prosječne brzine strujanja i protoka za svaki profil

Točka na profilu	Brzina strujanja za profil (a)	Brzina strujanja za profil (b)	Brzina strujanja za profil (c)	Brzina strujanja za profil (d)
1	5,54	4,28	6,48	7,23
2	3,57	22,86	6,92	7,21
3	15,90	1,40	6,61	3,55
4	21,00	2,29	7,34	0,57
5	16,97	1,40	3,45	3,05
6	4,59	/	/	5,53
7	5,95	/	/	7,00
8	16,61	/	/	7,70
9	7,77	/	/	8,06
/	Prosječna brzina za profil (a)	Prosječna brzina za profil (b)	Prosječna brzina za profil (c)	Prosječna brzina za profil (d)
/	11,38	6,44	6,16	6,31
/	Protok za profil (a)	Protok za profil (b)	Protok za profil (c)	Protok za profil (d)
/	0,36	0,20	0,19	0,20

- Brzine strujanja su izražene u mjernoj jedinici m/s .

3.1.6. Proračun protoka za profile

Odabralo se pet točaka koje se nalaze na istima pozicijama za sva četiri profila. Iz vrijednosti brzina u tim točkama izračunale su se prosječne brzine za svaki profil zasebno. Svaka od tih brzina izmnožila se sa iznosom površine poprečnog presjeka segmenta i dobio se protok za svaki profil.

Formule koje su korištene za proračun prosječne brzine strujanja i protoka za svaki profil su:

$$V_{\text{sred.}} = \frac{v_1 + v_2 + v_3 + v_4 + v_5}{5} - \text{formula za proračun srednje brzine strujanja za profil} \quad (2-4)$$

$$A = r^2 * \pi - \text{formula za proračun površine poprečnog presjeka segmenta} \quad (2-5)$$

$$Q = v_{\text{sred.}} * A - \text{formula za proračun protoka za profil} \quad (2-6)$$

gdje su: v_{sred} – srednja brzina strujanja za profil (m/s)

v_n – brzina za svaku pripadajuću točku (m/s)

A – površina poprečnog presjeka segmenta (m²)

r – radijus poprečnog presjeka segmenta (m)

$\pi \approx 3,14$ – matematička konstanta

Q – protok (m³/s)

3.1.7. Opažanja tijekom prvog mjerenja

Prva dva profila (a i b) se nalaze iza pregrade tako da iza njih dolazi do većih turbulencija zbog same pregrade i do pojave Venturijevog efekta koji dodatno utječe na promjenu brzine strujanja i pad tlaka.

Na profilu (b) koji je odmah iza pregrade je najveća brzina u središnjoj točki (2) jer nju ne pokriva pregrada i tu je tok zraka najkoncentriraniji, a na svim ostalim točkama je manja pošto taj pad vjerojatno uzrokuje sama pregrada, dok je na profilu (a) koji je iza profila (b) isto u središnjoj točki (4) najviša brzina, po točkama koje se nalaze na horizontali oko te točke je raspored brzine linearno manji u obje strane, i postoji mali porast brzine u točki (8) te pad u točki (9).

Na profilu (d) koji je najudaljeniji od pregrade je najveća brzina strujanja u točki (9) zbog načina kretanja zračne struje tj. jer prije profila (d) se nalazi koljeno u koje struja udara i zbog takvog specifičnog kretanja dolazi do toga da je najveća brzina strujanja u točki (9) koja se nalazi na najnižoj razini profila. Nakon toga brzina strujanja pada do točke (4), i onda raste prema točki (1). U točkama (1) i (2) koje su na horizontalnoj osi je brzina blizu maksimuma. Na profilu (c) koji se nalazi neposredno ispred sam pregrade je brzina maksimalna u točki (5) koja se nalazi na najvišoj razini profila, konstantno je visoka u točkama (1), (2) i (3) koje se nalaze na horizontali te dolazi do naglog pada brzine u točki (4). Te pojave vjerojatno isto uzrokuju turbulencije i neposredna blizina pregrade.

3.2. Direktno mjerenje brzine strujanja fluida pomoću termalnog manometra

3.2.1. Opis ispitivanja

Drugo mjerenje se obavilo zbog pojave negativnih padova tlaka, što je iziskivalo korištenje apsolutnih vrijednosti prilikom korjenovanja razlike tlakova. Ovim mjerenjem se mjerilo direktno brzinu strujanja fluida pomoću termalnog manometra umjesto proračunavanja brzine strujanja kao u prvom mjerenju gdje je se moralo proračunati korištenjem poznatih vrijednosti statičkog tlaka, totalnog tlaka i gustoće fluida.

Termalni manometar radi na principu da u sondi ima užarenu nit i kako fluid (zrak) hladi nit, na temelju razlike temperature, manometar proračuna približnu vrijednost brzine strujanja fluida.

Sam manometar, koji je prikazan na slici 3-16, nismo postavljali na tronožac, nego smo samo sondu micali po istim predefiniranim otvorima, na istome ispitivanom segmentu kao u prvom mjerenju, kao što je bilo prikazano na slikama 3-6, 3-7, 3-8 i 3-9 te smo brzine direktno očitali sa manometra.



Slika 3-16 Termalni manometar

U tablici 3-6 nalazi se prikaz promjene brzina strujanja i protoka po profilu sa termalnim manometrom.

Tablica 3-6 Prikaz direktno mjerenih brzina strujanja fluida po profilima, proračuna prosječne brzine strujanja i protoka za svaki profil

Točka na profilu	Brzina strujanja za profil (a)	Brzina strujanja za profil (b)	Brzina strujanja za profil (c)	Brzina strujanja za profil (d)
1	5,30	3,60	7,20	7,86
2	3,90	22,90	6,50	8,43
3	4,50	3,40	5,30	3,42
4	12,40	5,20	6,20	2,85
5	15,80	7,80	1,10	5,39
6	14,20	/	/	6,92
7	7,90	/	/	8,32
8	14,10	/	/	8,71
9	10,40	/	/	8,63
/	Prosječna brzina za profil (a)	Prosječna brzina za profil (b)	Prosječna brzina za profil (c)	Prosječna brzina za profil (d)
/	10,02	8,58	5,26	7,052
/	Protok za profil (a)	Protok za profil (b)	Protok za profil (c)	Protok za profil (d)
/	0,32	0,27	0,17	0,22

- Brzine strujanja su izražene u mjernoj jedinici *m/s*.

Formule koje su korištene za proračun promjene brzine strujanja i protoka:

$$v_{\text{sred.}} = \frac{v_1 + v_2 + v_3 + v_4 + v_5}{5} \text{ – formula za proračun srednje brzine strujanja za profil} \quad (2-7)$$

$$A = r^2 * \pi \text{ – formula za proračun površine poprečnog presjeka segmenta} \quad (2-8)$$

$$Q = v_{\text{sred}} * A \text{ – formula za proračun protoka za profil} \quad (2-9)$$

gdje su: v_{sred} – srednja brzina strujanja za profil (m/s)
 v_n – brzina za svaku pripadajuću točku (m/s)
 A – površina poprečnog presjeka segmenta (m²)
 r – radijus poprečnog presjeka segmenta (m)
 $\pi \approx 3,14$ – matematička konstanta
 Q – protok (m³/s)

Na kraju samog ispitivanja se, termalnim manometrom, mjerila prosječna brzina strujanja zraka na izlazu ispitivanog segmenta. Mjerena brzina strujanja je iznosila 6,34 m/s. Nakon toga se taj iznos pomnoži sa iznosom površine poprečnog presjeka profila ispitivanog segmenta koji iznosi 0,0314 m² korištenjem formule pod brojem (2-9) sa prethodne stranice te se dobije vrijednost protoka za izlaz ispitivanog segmenta u iznosu od 0,199076 m³/s = 11,94456 m³/min = 716,6736 m³/h.



Slika 3-17 Krilni anemometar

Također se, radi usporedbe rezultata, sa krilnim anemometrom, prikazanim na slici 3-17, izmjerilo koliko metara zraka je prošlo u jednoj minuti kroz kraj ispitivanog segmenta. Ta vrijednost iznosi 387 m/min. Nakon što se ta vrijednost pomnoži sa iznosom površine presjeka profila ispitivanog segmenta koji iznosi 0,0314 m² korištenjem formule pod brojem (2-9) sa prethodne stranice dobije se vrijednost od 12,15158 m³/min = 0,20253 m³/s = 729,108 m³/h.

Razlika vrijednosti protoka kroz ispitivani segment u ta dva mjerenja iznosi 1,3%.

3.2.2. Opažanja tijekom drugog mjerenja

Kao i u prvom mjerenju, pregrada ostaje na istom mjestu, samo mijenjamo mjerni uređaj. To je sada termalni manometar. Venturijev efekt i turbulencije su prisutne na istim lokacijama kao i u prvom mjerenju.

Na profilu (*b*) je maksimalna brzina strujanja u središnjoj točki (2) te je svuda oko te točke manja zbog samih turbulencija i Venturijevog efekta, eventualno je prisutan blagi porast brzine u točkama koje se nalaze na vertikalnoj osi profila (4) i (5). Na profilu (*a*) je opet prisutan taj najveći porast u točkama koje ne prekriva pregrada (3), (4) i (5) te linearni pad u ostalim točkama, osim u točki (8).

Na profilu (*d*), koji je opet najudaljeniji od pregrade, je u točkama (1) i (2) brzina dosta velika, onda pada naglo u (3) i (4) te od (4) nadalje opet linearno raste. Na profilu (*c*), koji se nalazi neposredno ispred pregrade, je otprilike na svim točkama jednaka brzina osim na točki (5) gdje opet dolazi do naglog pada brzine.

Raspodjela veličine protoka, je kao i u prvom mjerenju, identična raspodjeli brzina, samo su vrijednosti uvećane za veličinu površine poprečnog presjeka profila.

3.3. Usporedba rezultata mjerenja Pitotovom cijevi i termalnim manometrom

U tablici 3-7 nalazi se prikaz razlike između mjerenja Pitotovom cijevi i termalnim manometrom.

Tablica 3-7 Razlika brzina između mjerenja Pitotovom cijevi i termalnim manometrom

Točka na profilu	Razlika brzina na profilu (a)	Razlika brzina na profilu (b)	Razlika brzina na profilu (c)	Razlika brzina na profilu (d)
1	4,17	15,89	10,00	8,14
2	8,47	0,19	6,07	14,60
3	71,70	58,83	19,83	3,40
4	40,96	55,97	15,54	80,00
5	6,89	82,06	68,13	43,41
6	67,68	/	/	20,10
7	24,68	/	/	15,88
8	15,11	/	/	11,61
9	25,29	/	/	6,61

- Veličine u tablici su postotne vrijednosti.

Razlike protoka između mjerenja Pitotovom cijevi i termalnim manometrom:

- 1) Profil (a) = 9,60 %
- 2) Profil (b) = 24,91 %
- 3) Profil (c) = 14,58 %
- 4) Profil (d) = 17,61 %

3.3.1. Opažanja razlika između mjerenja Pitotovom cijevi i termalnim manometrom

Prva stvar koju možemo primjetiti kod razlike u mjerenjima je da praktički nema razlike između iznosa brzina strujanja i protoka jer su protoci samo uvećani za iznos površine poprečnog presjeka profila ($A = 0,0314 \text{ m}^2$). Od dvadeset i osam mjerenja, na samo devet mjerenja (32%) su razlike između mjerenja manje ili jednake 10 %. U ostalih 68 % mjerenja su razlike veće od 10 %. Doprinos tim većim razlikama su turbulencije koje se događaju unutar sustava, Venturijev efekt, sam put koji zrak prelazi od ventilatora pa do ispitivanog segmenta (tok zraka trpi 7 lokalnih gubitaka – koljena i 6 linijskih gubitaka) što doprinosi i stvaranju turbulencija te sama činjenica što sustav na kojem se radilo ispitivanje nije idealan.

4. MODELIRANJE TURBULENCIJA ZA CFD ANALIZU

4.1. Što su uopće turbulencije?

„Turbulencije su najvažniji, neriješeni problem klasične fizike.“ (FEYNMAN, 1965)

Čak i nakon par desetljeća (SOLMAZ, 2019) što su znanstvenici izrazili mišljenja oko ovog problema, turbulentno modeliranje još uvijek nije jednostavna stvar.

Tok fluida je klasificiran u dvije glavne kategorije:

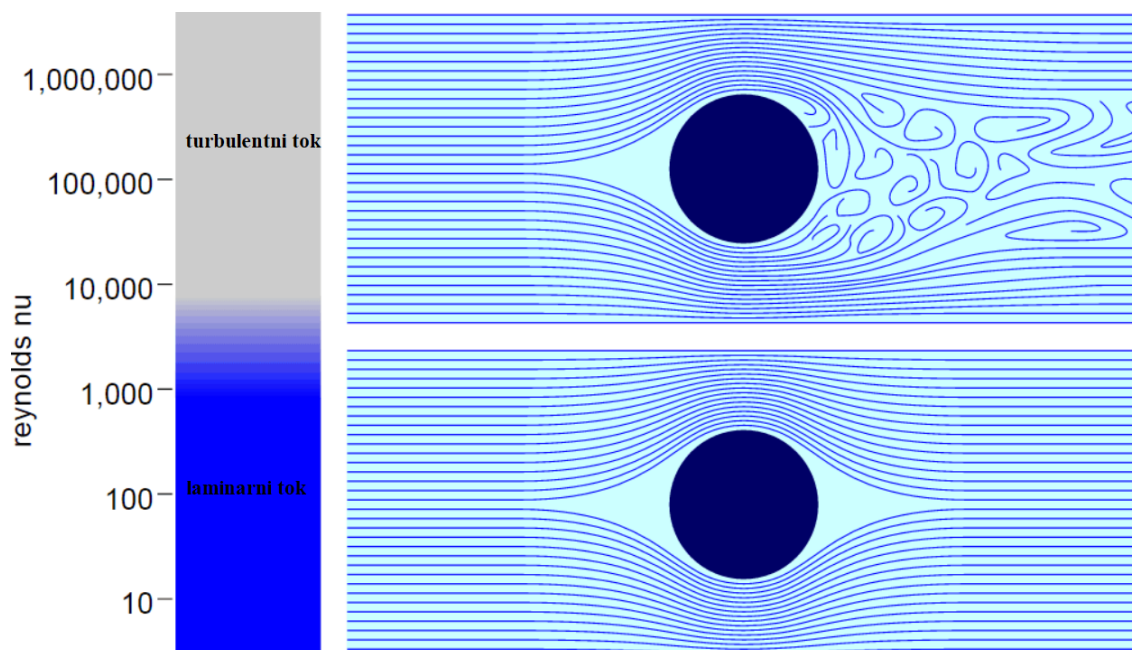
- 1) laminarni tok
- 2) turbulentni tok.

O kakvom toku se radi ovisi o svojstvima tog fluida pod utjecajem dinamičkih uvjeta, ne o svojstvima samog fluida.

Laminarni tok je tok u kojem fluid teče bez smetnji (trenja) između stijenki sustava u kojem teče i fluida. Lako ga se proučava numerički i eksperimentalno.

Turbulentni tok je tok u kojem fluid teče kaotično te u kojem se stvaraju vrtlozi i nestabilnosti toka (turbulencije). Turbulentni tok je jako teško, a koji put i nemoguće proučavati i numerički i eksperimentalno.

Na slici 4-1 vizualno je prikazan laminarni i turbulentni tok čestice kroz fluid.



Slika 4-1 Prikaz dvaju osnovnih vrsta tokova (CONNOR, 2019)

Ranije (SOLMAZ, 2019), determinacija vrste toka fluida numeričkim putem je bila jako teška. Irski znanstvenik Osborne Reynolds je otkrio bezdimenzijski broj koji nam daje uvid u vrstu toka na temelju statičkih i dinamičkih svojstava kao što su brzina strujanja, gustoća fluida, dinamički viskozitet i odabrana duljina (naprimjer duljina cijevi ili duljina tetive krila). Formula po kojoj se računa Reynoldsov broj glasi:

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot v \cdot L}{\mu} = \frac{\text{inercijalne sile}}{\text{viskozne sile}} \quad (3-1)$$

gdje su: ρ – gustoća fluida (kg/m^3)
 v – najveća brzina strujanja fluida (m/s)
 L – odabrana duljina (m)
 μ – kinematički viskozitet fluida (m^2/s)

Ako su inercijalne sile – koje se odupiru promjeni brzine objekta i uzroka pokreta fluida – dominantne, tok fluida je turbulentan. Nasuprot, ako su viskozne sile, koje su definirane kao otpor tečenju, dominantne, onda je tok laminaran.

Turbulencije, dakle uključuju nekoliko prepreka, i zbog toga zahtijevaju rigorozni trud tokom numeričke i eksperimentalne analize. Turbulentni tok je vrsta toka koji je nemiran, jako nepravilan u vremenu i prostoru, trodimenzionalan, rotacijski, disipativan (energija se prilikom te vrste toka rasipa) i difuzan (dolazi do pojave transporta tvari zbog razlike u koncentracijama) pri visokim Reynoldsovim brojevima. Zbog tih odstupanja u turbulentnom toku, dolazi do pojave jako malih fluktuacija u brzini strujanja, pritisku i temperaturi. Da bi se te fluktuacije prilagodile unutar Navier-Stokes jednadžbi potrebno je mnogo hardvera, softvera i ljudskog napora. Zbog toga, prilikom modeliranja turbulentnog toka potrebno je implementirati prikladni numerički model.

4.2. Modeliranje turbulencija

Koji model turbulencija (SOLMAZ, 2019) je prikladan za našu CFD analizu je problematično pitanje. Da bismo odabrali prikladan model i izvršili simulaciju koliko je to precizno moguće, moramo:

- Proučiti fizikalnu pojavu da razumijemo fenomen.
- Istražiti literaturu, detaljno, da bismo definirali prikladan model.
- Ako je literatura loša, isprobati par modela da dobijemo precizno očekivanje.
- U procesu procjene, brinuti se za model koji ćemo primijeniti..

Također, nam je kod samog modeliranja turbulencija bitno odrediti o kojem tipu toka fluida se radi (laminarni ili turbulentni) koji ovisi, kao što smo vidjeli, o Reynoldsovom broju.

Ne postoji neki univerzalni tip modela koji je primjenjiv za sve vrste turbulencija. Generalno su modeli turbulencija klasificirani na temelju jednadžbi i numeričkih metoda koje se koriste za proračun turbulentnog viskoziteta.

Glavna svrha modeliranja turbulencija je da se otkriju jednadžbe kojima se mogu predvidjeti brzina strujanja, pritisak i polja temperature, bez proračuna potpunog modela turbulentnog toka kao funkcije vremena. Nije potrebno rješavati Navier-Stokes jednadžbe za svaku vrijednost fluktuacije jer većina inženjerskih problema ne zahtijeva toliko opsežno rješenje.

Modeli turbulencija se mogu sažeti na sljedeći način (SOLMAZ, 2019):

- DNS (*Direct numeric solution*) – izravna implementacija vrijednosti fluktuacija u Navier-Stokes jednadžbe bez modela turbulencija.
- LES (*Large Eddy simulation*) – prosječni model turbulencija između DNS i RANS u kojem se Navier-Stokes jednadžbe koriste za rješavanje vrtloga koji imaju velika odstupanja, prikladan model je preferiran za rješavanje vrtloga koji imaju mala odstupanja.
 - Eddy (vrtlog) – tok vode ili zraka koji se giba u suprotnom smjeru od glavnog toka, pogotovo ako je tok kružnog gibanja
- RANS (*Reynolds-averaged Navier-Stokes*) – matematički model koji se temelji na prosječnim vrijednostima varijabli za statičko stanje i dinamički tok, numeričko rješenje se dobije pomoću modela turbulencija koji je proizvoljno odabran da bi se saznali utjecaji fluktuacija na glavni tok fluida.

Pošto zahtijevaju mnogo hardvera, vremena za proračun i ljudskog napora, RANS/URANS (*Unsteady Reynolds-averaged Navier Stokes*) metode, i podmodeli su često korišteni za rješavanje raznih CFD problema. Korištenje LES metoda je rijetko, ali moguće u nekim slučajevima.

Sljedeće su navedeni najistaknutiji modeli turbulencije koji se koriste (SOLMAZ, 2019):

1) Spalart-Allmaras model

- 1D model,
- nema funkcija zidova,
- stabilan uz dobru konvergenciju,
- pogodnosti: aerodinamički tokovi, nadzvučni tokovi na aeroprofilima,
- ograničenja: rješavanje posmičnih tokova, razvojeni tok, opadanje turbulencija.

2) K-epsilon model

- 2D model (turbulentna kinetička energija i disipacija),
- koristi funkcije zidova,
- dobra konvergencija i mali zahtjev za memorijom,
- pogodnosti: može se koristiti za stlačivi/nestlačivi tok, interakcija vanjskog toka sa kompleksnom geometrijom,
- ograničenja: nije precizan za zidove bez trenja, nepovoljni gradijenti tlaka, jaka zakrivljenost u toku, mlazni tok.

3) K-omega model

- 2D model (turbulentna kinetička energija i disipacija),
- lakše se dolazi do rješenja nego sa epsilon modelom,
- koristi funkcije zidova,
- dobra konvergencija i mali zahtjev za memorijom,
- pogodnosti: slično kao kod k-epsilon modela uz poboljšanu preciznost za rješavanje: unutarnjih tokova, zakrivljenosti, odvojenih tokova i mlaznih tokova,
- ograničenja: teško ga prebaciti u drugi model i osjetljiv na početne uvjete.

4) K-omega SST

- teorija samosličnosti,
- rješava male vrtloge uz podmodele i velike vrtloge na temelju geometrijskog proračuna,
- odvaja polje brzine u gotove dijelove (veliki vrtlozi) i djelomične dijelove (mali vrtlozi),
- pogodnosti: termalni zamor, vibracije, ploveći tokovi (za dizajn brodova),
- ograničenja: poteškoće u područjima blizu zidova.

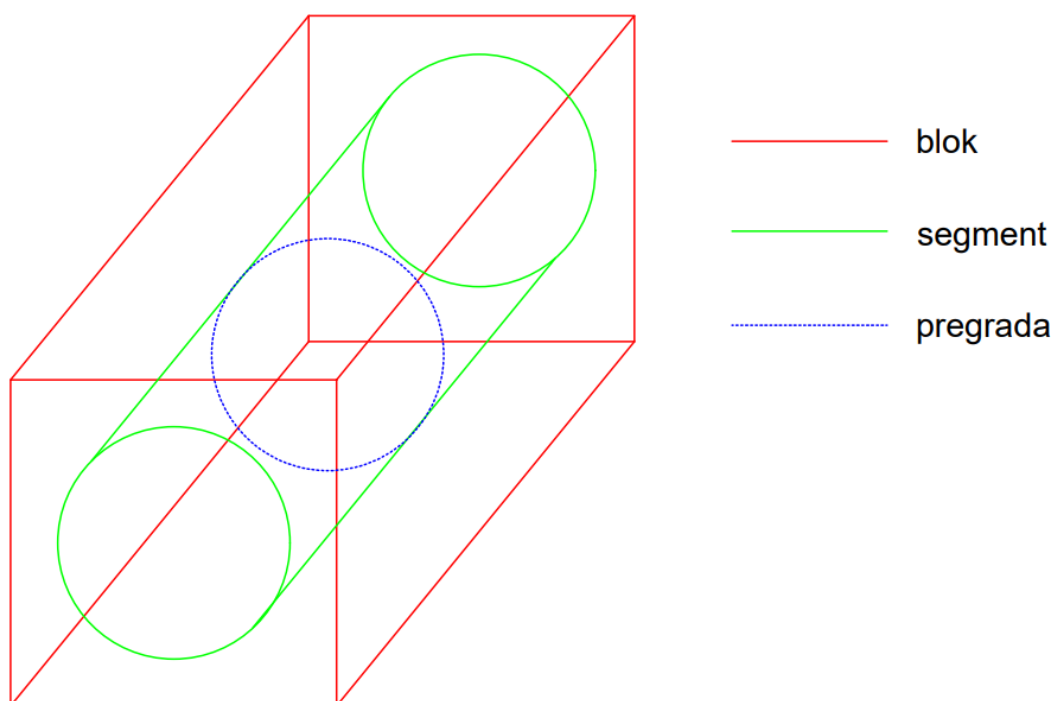
5) LES Smagorinsky & LES Spart Allmaras model

- teorija samosličnosti,
- rješava male vrtloge uz podmodele i velike na temelju geometrijskog proračuna,
- odvaja polje brzine u gotove dijelove (veliki vrtlozi) i djelomične dijelove (mali vrtlozi),
- pogodnosti: termalni zamor, vibracije, ploveći tokovi (za dizajn brodova),
- ograničenja: poteškoće u područjima blizu zidova.

5. SIMULACIJA TOKA ZRAKA KROZ ISPITIVANI SEGMENT U OPENFOAM-U

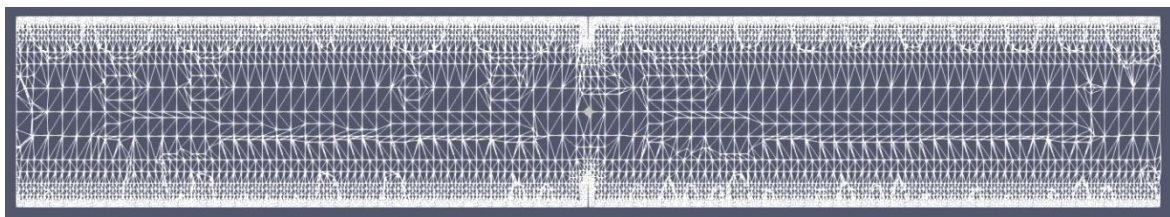
5.1. Opis rada OpenFOAM-a u izradi simulacije

Prvo što se napravilo da bi se izvela simulacija je da se izradila shema tj. 3D blok i model ispitivanog segmenta u AutoCAD ili MicroStation software-u kao što je prikazano na slici 5-1.



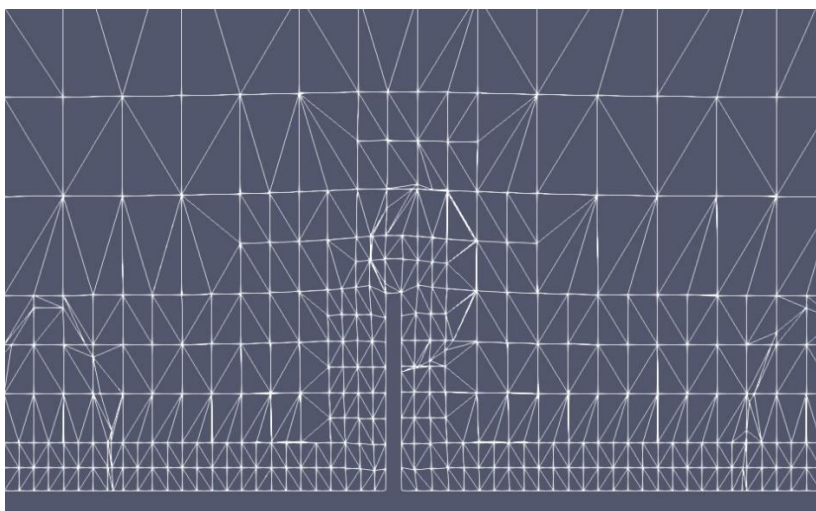
Slika 5-1 Blok i ispitivani segment

Blok koji se izradio u AutoCAD ili Microstation software-u se treba izvesti u STL datoteku da bi ga software mogao uopće prepoznati. Nakon toga alati koji služe za rad sa mrežama generiraju mrežu tj. računalnu rešetku počevši od generičke geometrije navedene kao ta STL datoteka. Ta datoteka je automatski povezana s hex – dominantnim rešetkama. Naredba pod nazivom *blockMesh* radi kvadratičnu mrežu od bloka (crvenog kvadra) koji je prikazan na slici 5-1, a krajnju mrežu dobivamo pomoću naredbe *snappy-hexMesh* koja uklapa oblik segmenta (zeleni valjak) kao STL datoteku u tu kvadratičnu mrežu kako je to prikazano na slikama 5-2 i 5-3. Nakon što se sredi geometrija samog ispitivanog segmenta unesu se početni uvjeti. To je brzina u iznosu od 6,34 m/s. Model za proračun i prikaz raspodjele tlakova i brzina u OpenFOAM-u koji se koristi je k-epsilon model.



Slika 5-2 Uzdužni profil mreže na ispitivanom segmentu

Što se događa je da se prilikom unosa STL datoteke blok i segment koji su prikazani na slici 5-1 unesu u softver i onda se mreža koja se nalazi oko bloka i tijela „prilijepi“ na blok kao što je to prikazano na slici 5-2. To se događa putem naredbe *snappy-hexMesh* koja iterativnim postupkom precizno formira mrežu na bloku. Detalj sa iste mreže na bloku prikazan je na slici 5-3.

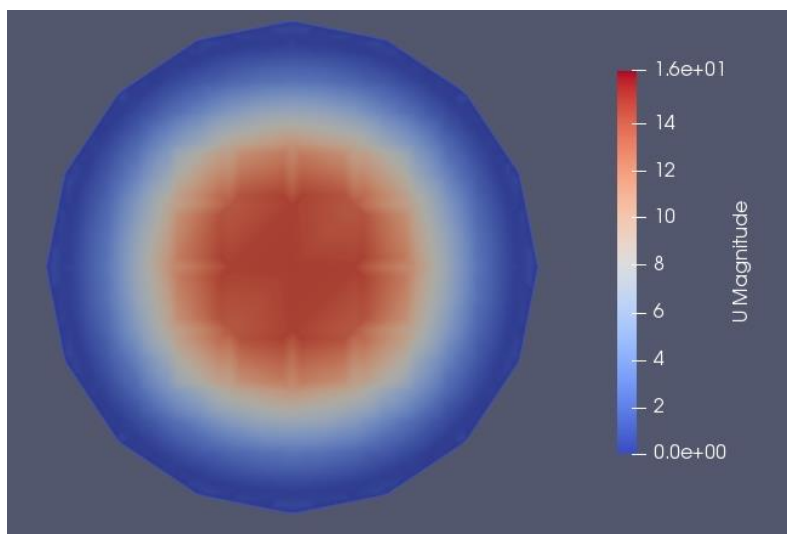


Slika 5-3 Detalj sa mreže ispitivanog segmenta

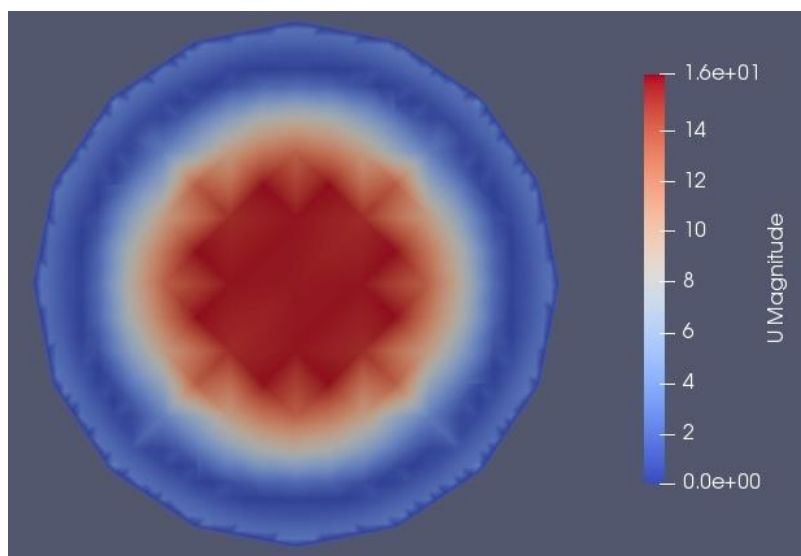
Nakon što se generira mreža, prije krajnjeg proračuna raspodjele tlakova i brzina strujanja, moraju se još postaviti rubni uvjeti. Ti rubni uvjeti su zidovi (stijenke segmenta) koji se nalaze sa obje strane ispitivanog segmenta, ulaz koji se nalazi otprilike 30 cm iza poprečnog presjeka (d), izlaz koji se nalazi na samome kraju ispitivanog segmenta i svojstvo zraka tj. njegov kinematički viskozitet.

Nakon postavljanja tih rubnih uvjeta unosi se naredba *simplefoam* koja isto iterativnim postupkom koristeći numeričku metodu proračuna i k-epsilon model daje krajnji proračun raspodjele tlakova i brzina po profilima. Rezultati simulacije raspodjele tlakova i brzina strujanja su prikazani na 5-4, 5-5, 5-6, 5-7, 5-8, 5-9, 5-10, 5-11, 5-12 i 5-13.

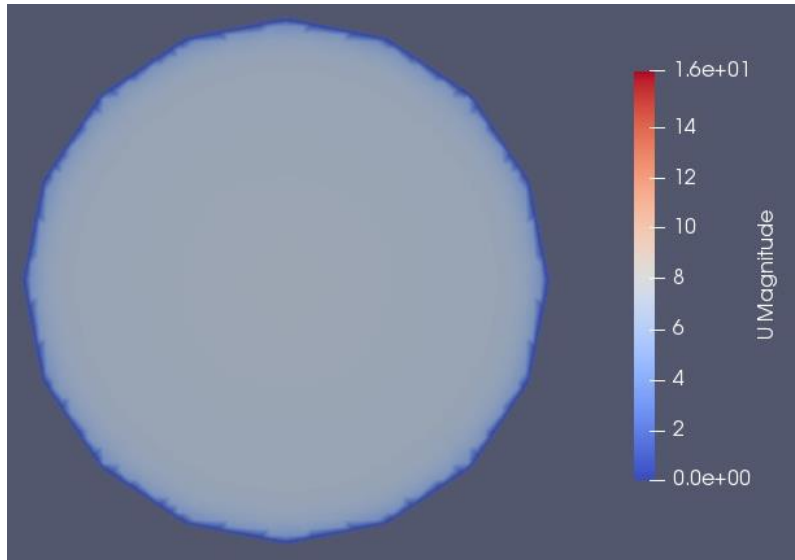
5.2. Ilustrirani prikaz rezultata simulacije za raspodjelu brzine strujanja po profilima



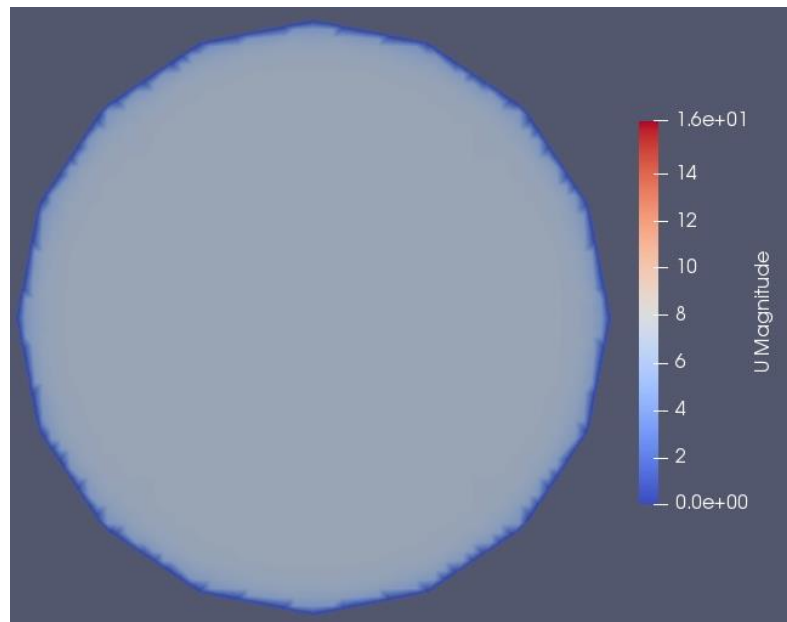
Slika 5-4 Raspodjela brzina strujanja - profil (a)



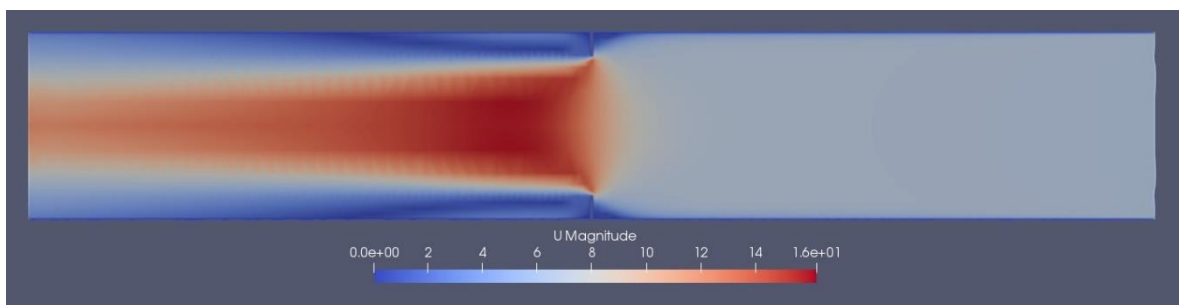
Slika 5-5 Raspodjela brzina strujanja - profil (b)



Slika 5-6 Raspodjela brzina strujanja - profil (c)



Slika 5-7 Raspodjela brzina strujanja - profil (d)



Slika 5-8 Raspodjela brzina strujanja po cijelom ispitivanom segmentu

5.2.1. Usporedba mjerenih rezultata brzine strujanja sa rezultatima iz simulacije

Krenemo li od početka segmenta tj. od profila (*d*) na mjerenim rezultatima možemo primjetiti manje fluktuacije između točaka (3), (4), i (5) i to na brzinama koje su mjerene Pitotovom cijevi, ali na ostatku profila je mjerena brzina strujanja uglavnom konstantna. Na rezultatu iz simulacije se vidi da je brzina strujanja konstantna po cijelom profilu osim uz stijenke gdje je nešto manja.

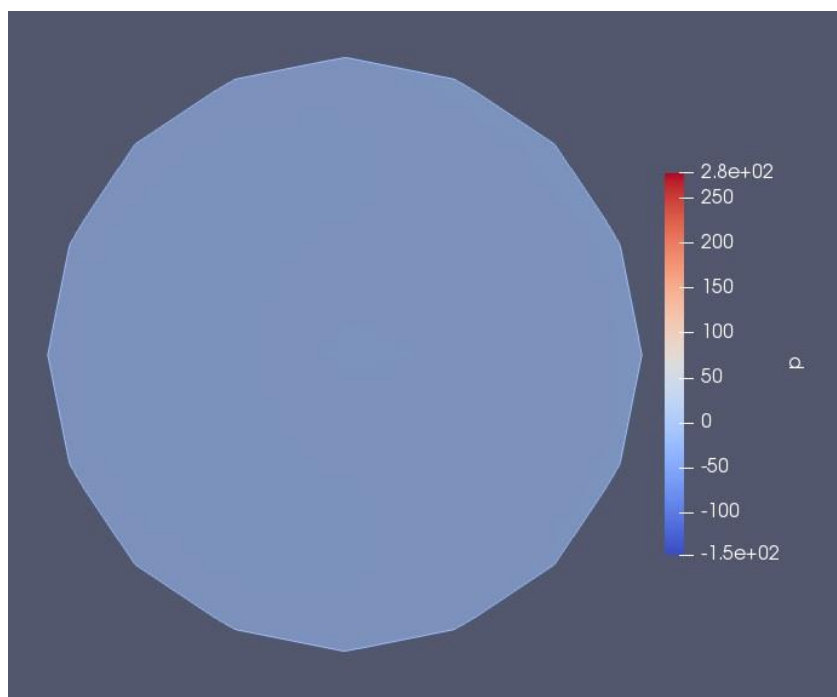
Na profilu (*c*) koji se nalazi neposredno ispred pregrade iz mjerenih rezultata možemo primjetiti neznatne promjene brzine strujanja između točaka uz izuzetak veće fluktuacije na točki (5). Na rezultatu iz simulacije se vidi da je brzina strujanja konstantna po cijelom profilu osim uz stijenke gdje je nešto manja.

Na profilu (*b*) koji se nalazi neposredno iza pregrade iz mjerenih rezultata možemo primjetiti da je brzina strujanja najveća (koncentrirana) u sredini profila u točki (2) te po obodu značajno i neravnomjerno pada. Na rezultatu iz simulacije se vidi da je brzina najveća u sredini profila i da oko sredine dolazi do neravnomjerne raspodjele tj. disipacije brzine (od sredine prema rubu dolazi do naglog pada, onda opet malo poraste i onda opet pada kod stijenki). Tome primarno pridonosi pregrada, a sekundarno turbulencije i Venturijev efekt.

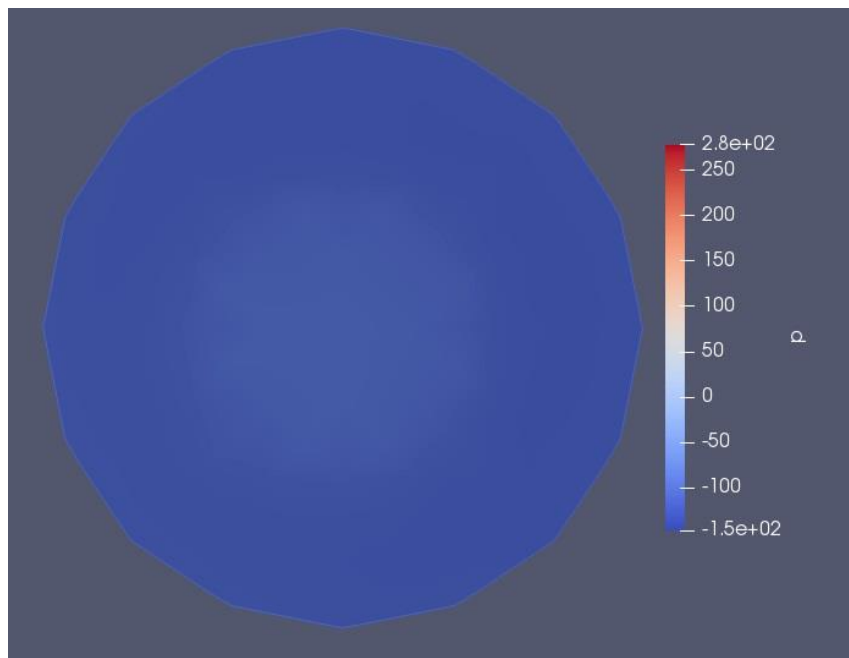
Na profilu (*a*) koji se nalazi na samom kraju segmenta iz mjerenih rezultata je još uvijek vidljivo da je brzina strujanja koncentrirana oko središta profila, ali puno manje nego na profilu (*b*). Raspodjela je neravnomjerna, ali se da primjetiti da teži stanju ravnoteže. Na rezultatu iz simulacije je isto tako vidljivo da je brzina još uvijek najveća u sredini, ali se vidi i da teži stanju ravnoteže (nema *peak-ove* oko centra kao što je prikazano na slici 5-5, tj. dolazi do ravnomjernog pada od sredine prema rubu, nego je više glatka kao na slici 5-4).

Iz cijelog uzdužnog presjeka ispitivanog segmenta možemo vidjeti kao što je prikazano na slici 5-8, da ispred pregrade je raspodjela brzine konstantna (malo je manja uz stijenke u usporedbi sa ostatkom segmenta) te da nakon pregrade dolazi do nagle promjene brzine strujanja, poglavito u sredini presjeka, ali da već nakon nekoliko centimetara dolazi do umiravanja uz pad brzine.

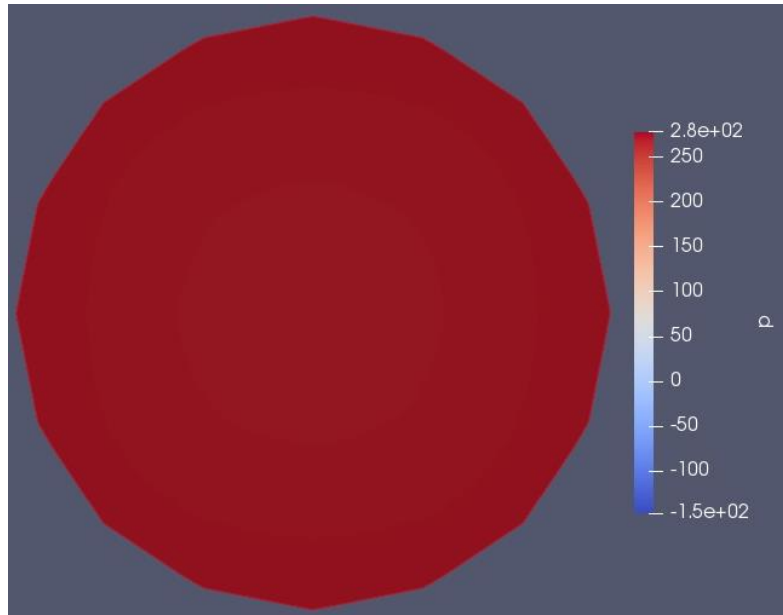
5.3. Ilustrirani prikaz rezultata simulacije za raspodjelu tlakova po profilima



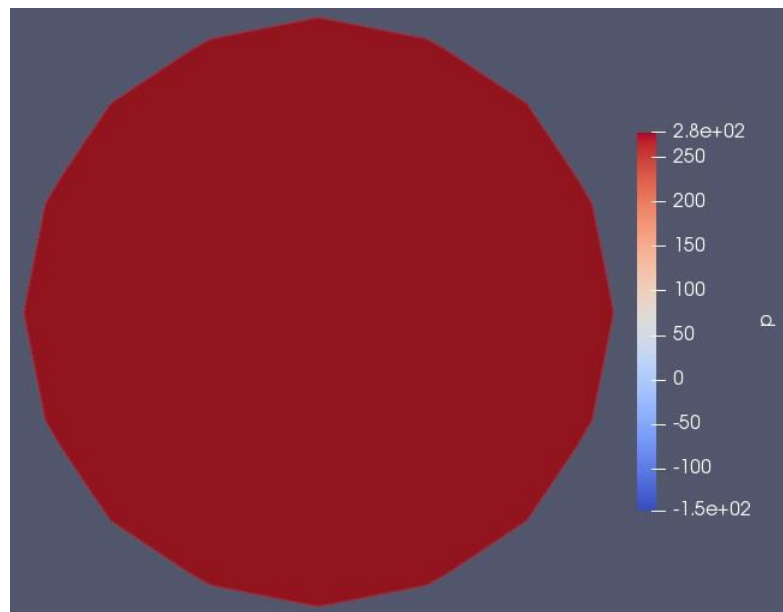
Slika 5-9 Raspodjela tlakova - profil (a)



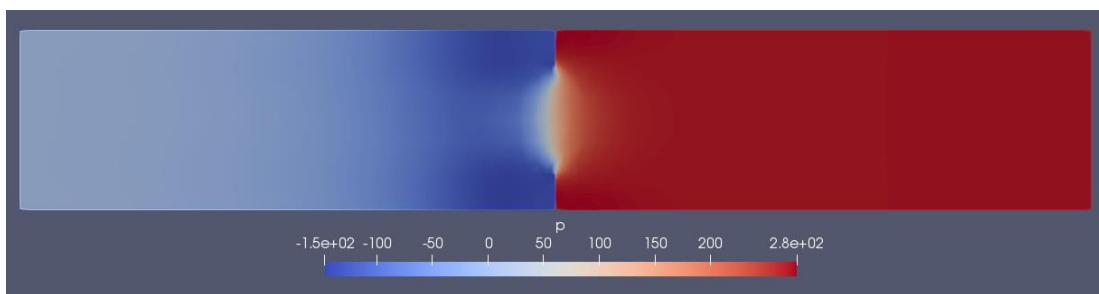
Slika 5-10 Raspodjela tlakova - profil (b)



Slika 5-11 Raspodjela tlakova - profil (c)



Slika 5-12 Raspodjela tlakova - profil (d)



Slika 5-13 Raspodjela tlakova po cijelom ispitivanom segmentu

5.3.1. Usporedba mjerenih rezultata tlakova sa rezultatima iz simulacije

Na profilu (*d*) vidimo iz mjerenih rezultata da je raspodjela tlaka konstantno maksimalna po profilu uz neznatne fluktuacije, što je vidljivo isto i na rezultatima simulacije kao što je prikazano na slici 5-12.

Na profilu (*c*) vidimo iz mjerenih rezultata da vrijednost tlaka opada u usporedbi sa profilom (*d*), ali tlak je isto cijelo vrijeme konstantan po profilu. Na rezultatima simulacije isto tako vidimo da, uz smanjenu vrijednost, je raspodjela tlaka konstantna po profilu.

Na profilu (*b*) koji se nalazi neposredno iza pregrade vidimo iz mjerenih rezultata da je pad tlaka najveći u točki (2) tj. u središtu profila. Po ostalim točkama je nešto manji. Tlak je puno manji u usporedbi na profile (*c*) i (*d*), oko 380 Pa. Na rezultatima simulacije vidimo da raspodjela tlaka nije konstantna. U sredini profila dolazi do pada tlaka od oko 50 Pa, a po rubnom dijelu profila dolazi do još većeg pada tlaka u usporedbi sa sredinom profila, oko 150 Pa.

Na profilu (*a*) vidimo iz mjerenih rezultata da je pad tlaka manji u usporedbi sa profilom (*b*). Dolazi do najveće fluktuacije u točki (7), moguće zbog turbulencija i nepotpune preciznosti mjernog instrumenta (Pitotova cijev). U ostalim točkama je pad tlaka uz manje fluktuacije konstantan.

Raspodjela tlakova po cijelom segmentu koja je prikazana na slici 5-13 nam ukazuje na to da je tlak konstantan i visok dok zrak ne udari u pregradu. Nakon udara u pregradu dolazi do naglog pada tlaka koji nije konstantan. Nakon pregrade disipacija tlaka je neravnomjerna te kako zrak teče dalje nakon pregrade, tlak počinje opet približno konstantno rasti.

Mjerena razlika tlakova prije i poslije udara u pregradu iznosi oko 380 Pa, dok simulirana razlika tlakova prije i poslije pregrade iznosi oko 100-120 Pa. Ta razlika dolazi do izražaja zbog nepotpune preciznosti mjernog instrumenta (Pitotova cijev), hrapavosti stijenka cijevi, lokalnih i linijskih gubitaka te jer se nalazimo u realnim uvjetima. Iako su u simulaciji rezultati znatno veće razlike u odnosu na laboratorijsko ispitivanje, oni opet ovise o ulaznim podacima koji su dobiveni iz laboratorijskih pitanja.

6. ZAKLJUČAK

Kroz ovaj rad smo mogli malo dublje uroniti u samu CFD metodu, teoriju iza te metode i njenu primjenu. Mogli smo vidjeti da je metoda jako praktična za kompleksne proračune turbulencija i samog utjecaja fluida i sila koje nastaju gibanjem tih fluida na određena tijela. Po tome je metoda primarno praktična za proračun aerodinamičkih svojstava prijevoznih sredstava (zrakoplovi, automobili, brodovi, svemirske rakete,...), a uz to smo mogli vidjeti i da ima široku primjenu i u ostalim djelatnostima (građevinarstvo, kemijska industrija, medicina, vremenska prognoza,...).

Usporedbom rezultata pada tlakova i brzine strujanja dobivenih laboratorijskim ispitivanjima (Pitotova cijev i termalni manometar) i rezultata dobivenih samom računalnom simulacijom tj. primjenom same CFD metode, mogli smo vidjeti da postoje određene razlike i odstupanja.

Dok se za CFD metodu trebaju samo vrijednosti unesti u računalo i pustiti računalo da samo provede simulaciju, laboratorijsko i terensko ispitivanje ovisi o vještini osobe koja izvodi ispitivanje, o svojstvima fluida i o svojstvima samog sustava u kojem se ispitivanje provodi. Rezultati koje smo dobili laboratorijskim ispitivanjem i računalnom simulacijom se značajno razlikuju, ali to ne dokazuje da je računalna simulacija bolja tj. točnija od laboratorijskih ispitivanja jer opet rezultati računalne simulacije ovise o ulaznim podacima dobivenim iz laboratorijskih ispitivanja.

CFD metoda je jako korisna jer ima široku primjenu i za neka veća postrojenja ne iziskuje velike troškove te je precizna u davanju samih rezultata, ali sama po sebi neće moći u potpunosti zamijeniti ispitivanja koja se provode na terenu i laboratoriju. CFD metoda daje dobre temelje za pristup laboratorijskim i terenskim mjerenjima, ali ih neće moći u tako skoroj budućnosti potpuno zamijeniti.

7. LITERATURA

BROZOVIĆ D., KOVAČEC A., LADAN T., 1999. *Venturijeva cijev*. Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Zagreb. Leksikografski zavod Miroslav Krleža.

URL: <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=64287> (03.01.2021.)

CFD DIRECT. 2021a. *About OpenFOAM*.

URL: <https://cfdirect.com/openfoam/about/> (02.01.2021.)

CFD DIRECT. 2021b. *OpenFOAM features*.

URL: <https://cfdirect.com/openfoam/features/> (02.01.2021.)

CONNOR, N. 2019. *Laminar flow vs. Turbulent flow*.

URL: <https://www.reactor-physics.com/engineering/fluid-dynamics/laminar-flow-vs-turbulent-flow/> (04.01.2021.)

CRAHMALIUC, R. 2020. *Introduction to CFD analysis with practical examples*.

URL: <https://www.simscale.com/blog/2016/03/what-everybody-ought-to-know-about-cfd/> (30.12.2020.)

FAIRCLOUGH, C. 2015. *Exploring the Venturi effect*.

URL: <https://www.comsol.com/blogs/exploring-the-venturi-effect/> (03.01.2021.)

FEMTO ENGINEERING. 2017. *What is CFD?*

URL: <https://www.femto.eu/stories/what-is-cfd/> (28.12.2020.)

GIRALDO, G. 2020. *CFD modeling, analysis and online simulation for beginners*.

URL: <https://www.simscale.com/blog/2019/04/cfd-analysis-for-beginners/>
(28.12.2020.)

HALL, N. 2015. *Navier-Stokes equations*.

URL: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/nseqs.html> (29.12.2020.)

HALL, N. 2015. *Pitot-static tube*.

URL: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/pitot.html> (03.01.2021.)

MURTI, N. 2018. *What is Venturimeter? Construction and working*.

URL: <https://eligoprojects.com/what-is-venturimeter-construction-and-working-equation/> (25.01.2021.)

SIEMENS. 2020a. *Simulation on an Airbus 380*.

URL: <http://mdx2.plm.automation.siemens.com/cfdImage/simulation-airbus-a380>
(28.12.2020.)

SIEMENS. 2020b. *What is CFD simulation?*

URL: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/fr/our-story/glossary/cfd-simulation/67873> (29.12.2020.)

SOLMAZ, S. 2019. *Turbulence: Which model should I select for my CFD analysis?*

URL: <https://www.simscale.com/blog/2017/12/turbulence-cfd-analysis/> (05.01.2021.)

WASSERMAN, S. 2018. *CFD analysis to optimize the aerodynamics of a race car*.

URL: <https://www.ansys.com/blog/prepare-engineering-careers-simulation-popping-everywhere> (29.12.2020.)

WIKIPEDIJA. 2020. *OpenFOAM*.

URL: <https://hr.wikipedia.org/wiki/OpenFOAM> (02.01.2021.)