Računalna simulacija strujanja kroz stropni ventilacijski difuzor

Čukelj, Juraj

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:214445

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Juraj Čukelj

Zagreb, godina 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Dr. sc. Severino Krizmanić, dipl. ing.

Student:

Juraj Čukelj

Zagreb, godina 2020.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru dr.sc. Severinu Krizmaniću na pruženim savjetima, susretljivosti i pomoći tijekom izrade ovog rada. Također zahvaljujem doc. dr. sc. Darku Smoljanu na susretljivosti i ustupljenim podatcima.

Juraj Čukelj

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodostrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: Juraj Čukelj Mat. br.: 0035206628

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Računalna simulacija strujanja zraka kroz stropni ventilacijski difuzor**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Numerical simulation of air flow trough ceiling ventilation diffuser**

Opis zadatka:

Pri projektiranju ventilacije i klimatizacije prostorija, svojstva toka zraka u zonama boravka imaju znatan utjecaj na toplinsku ugodnost i osjećaj propuha, a posebna pažnja se posvećuje strujanju u područjima koja se nalaze u neposrednoj blizini ventilacijskih otvora.

U ovome radu potrebno je provesti računalne simulacije strujanja zraka iz više izvedbi stropnog ventilacijskog difuzora, usporediti dobivene rezultate s eksperimentalnim podacima, te dati zaključak o primjenjivosti računalnih simulacija u tom slučaju.

U sklopu rada potrebno je:
- odabrati ili izraditi geometrijske modele ventilacijskog kanala, difuzora i prostorije, i prema potrebi uvesti pojednostavljenja;
- za odabrane geometrijske modele i rubne uvjete, obaviti sve postupke računalnog proračuna: prostorna diskretizacija geometrijskih modela, odabir i podešavanje numeričkog postupka, post-procesiranje rješenja.
- usporediti dobivene rezultate s dostupnim eksperimentalnim rezultatima.

Rad treba sadržavati:
- uvod;
- opis problema i metoda primijenjenih za njihovo rješavanje;
- odgovarajuće prikaze dobivenih rezultata i osvrt na rezultate;
- zaključke.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
28. studenog 2019.

Datum predaje rada:
1. rok: 21. veljače 2020.
2. rok (izvanredni): 1. srpnja 2020.
3. rok: 17. rujna 2020.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 24.2. – 28.2.2020.
2. rok (izvanredni): 3.7.2020.
3. rok: 21.9. - 25.9.2020.

Zadatak zadao:
Doc. dr. sc. Severino Krizmanić

Predsjednik Povjerenstva:
Prof. dr. sc. Igor Balen

SADRŽAJ

1. UVOD 1

1.1. ISTRUJNI OTVORI 1

1.2. PODJELA OTVORA PREMA ASHRAE 1

1.2.1. Grupa A 2

1.2.2. Grupa B 3

1.2.3. Grupa C 3

1.2.4. Grupa D 4

1.2.5. Grupa E 5

1.3. TOPLINSKA UGODNOST 5

1.3.1. Brzina strujanja 6

1.4. ODABIR NAČINA UBACIVANJA KONDICIONIRANOG ZRAKA 7

2. TEORIJSKE OSNOVE 8

2.1. OSNOVNE JEDNADŽBE MEHANIKE FLUIDA 8

2.2. TURBULENCIJA 9

2.3. MODELI TURBULENCIJE 11

2.4. κ-ω SST MODEL TURBULENCIJE. 12

2.5. TURBULENTNI GRANIČNI SLOJ 14

3. METODA KONAČNIH VOLUMENA 16

4. PRORAČUNI 20

4.1. GEOMETRIJSKI MODEL 20

4.2. PROSTORNA DISKRETIZACIJA PODRUČJA PRORAČUNA 23

4.3. ZADAVANJE RUBNIH UVJETA 26

4.4. ZADAVANJE VELIČINA κ-ω SST MODELA TURBULENCIJE 31

4.5. NUMERIČKE SHEME 32

5. REZULTATI PRORAČUNA 33

6. ZAKLJUČAK 47

POPIS SLIKA

Slika 1. Primjer strujanja zraka istrujnih otvora grupe A [1] 2
Slika 2. Primjer strujanja zraka istrujnih otvora grupe B [1] 3
Slika 3. Primjer strujanja zraka istrujnog otvora grupe C [1] 3
Slika 4. Primjer strujanja zraka istrujnog otvora grupe D [1] 4
Slika 5. Primjer strujanja zraka istrujnog otvora grupe E [1] 5
Slika 6. Utjecaj brzine strujanja i temperature zraka na PPD [1] 6
Slika 7. Utjecaj intenziteta turbulencija na PPD [1] 6
Slika 8. Profil bezdimenzijske brzine unutar graničnog sloja [4] 15
Slika 9. Model prostorije s centralno smještenim difuzorom 21
Slika 10. Difuzor s vrtložnim anemostatom 21
Slika 11. Smještaj difuzora u prostoru 22
Slika 12. Istrujna ploča, 1. verzija 22
Slika 13. Istrujna ploča, 2. verzija 23
Slika 14. Lopatice okružene prstenom, 2. verzija 23
Slika 15. Diskretizacija prostora za 1. verziju difuzora 24
Slika 16. Diskretizacija lopatica za 1. verziju 25
Slika 17. Diskretizacija prostora za 2. verziju 25
Slika 18. Lopatice okružene unutarnjim prstenom 26
Slika 19. Prikaz brzina po presjeku prostorije (300. iteracija) 33
Slika 20. Prikaz polja brzina po presjeku prostorije (400. iteracija) 33
Slika 21. Prikaz polja brzina po presjeku prostorije (1000. iteracija) 34
Slika 22. Prikaz polja brzina po presjeku prostorije (1500. iteracija) 34
Slika 23. Prikaz polja brzina po presjeku prostorije (2400. iteracija) 35
Slika 24. Eksperimentalno mjerenje, difuzor bez prstena [2] 35
Slika 25. Prikaz polja brzina po presjeku prostorije (50. iteracija) 37
Slika 26. Prikaz polja brzina po presjeku prostorije (400. iteracija) 37
Slika 27. Prikaz polja brzina po presjeku prostorije (2000. iteracija) 38

Slika 28. Eksperimentalno mjerenje, difuzor sa prstenom [2] 38
Slika 29. Strujnice u prostoriji (2D) 39
Slika 30. Strujnice u prostoriji (3D) 39
Slika 31. Prikaz y+ globalno 40
Slika 32. Prikaz veličine y^+ u kritičnim područjima 40
Slika 33. Prikaz veličine y+ u kritičnim područjima 41
Slika 34. Prikaz polja brzine na visini 1.5m od poda (xy-ravnina) 42
Slika 35. Prikaz polja brzine na visini 2.5m od poda (xy-ravnina) 42
Slika 36. Prikaz polja brzine na visini 3.9m od poda (xy-ravnina) 43
Slika 37. Usporedba rješenja r=60 cm [2] 44
Slika 38. Usporedba rješenja r=80 cm [2] 44
Slika 39. Usporedba rješenja r=90 cm [2] 45
Slika 40. Usporedba rješenja r=100 cm [2] 45
Slika 41. Odmak istrujne ploče [2] 46

POPIS TABLICA

Tablica 1: Koeficijenti k − ω SST modela turbulencije [9] 13

Tablica 2: Tipični rubni uvjeti (U, p, k) 28

Tablica 3: Nastavak tablice 2. 29

Tablica 4: Tipični rubni uvjeti (ω, $\boldsymbol{\nu t}$) 29

Tablica 5: Nastavak tablice 4. 30

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
F_n	[kg/s]	jačina konvekcije
f_i	[N/kg]	komponente vektora specifične masene sile
J_i	[-]	vektor fluksa fizikalne veličine
$\bar{k}$	[J/kg]	kinetička energija turbulencije
p	$[\mathrm{N/m^2}]$	tlak
$\bar{p}$	$[\mathrm{N/m^2}]$	statistički osrednjeno polje tlaka
p_{kin}	$[\mathrm{m^2}/s^2]$	kinematički tlak
R_e	[-]	Reynoldsov broj
v_i	[m/s]	komponente vektora brzine strujanja
$\bar{v}_i$	[m/s]	osrednjeni dio vektora brzine strujanja
$v_i{}'$	[m/s]	pulsirajući dio polja vektora brzine strujanja
v_n	[m/s]	projekcija vektora brzine u smjeru vanjske normale
v_t	[m/s]	karakteristična brzina turbulentnih pulsacija
δ_{ij}	[-]	Kroneckerov simbol
Σ_{ij}	$[\mathrm{N/m^2}]$	tenzor viskoznih naprezanja
φ	[-]	polje fizikalne veličine
Δn	[m]	udaljenost između čvorova konačnog volumena
Γ	[kg/ms]	koeficijent difuzije
μ	[Pas]	dinamička viskoznost
μ_t	[kg/ms]	turbulentna viskoznost
ρ	$[\mathrm{kg/m^3}]$	gustoća
ν	$[\mathrm{m^2/s}]$	kinematička viskoznost
ω	$[\mathrm{s^{-1}}]$	specifična brzina disipacije

SAŽETAK

Zračni sustavi klimatizacije danas se koriste za gotovo svaku modernu poslovnu ili građevinu druge namjene u kojoj je predviđen smještaj većeg broje ljudi. Kako bi se održavali traženi uvjeti unutar prostorije, u nju je potrebno je ubacivati dobavni zrak i odvoditi istrošen zrak.

Zrak se u prostoriju ubacuje na različite načine, a ovisno o načinu ubacivanja zraka dobiva se različito strujanje zraka unutar prostorije. Način strujanja zraka unutar prostorije značajno utječe na toplinsku ugodnost osoba unutar zone boravka.

U ovome radu su numeričkim simulacijama proračunata strujanja zraka unutar prostorije zadanih dimenzija. Simulacije su provedene primjenom metode konačnih volumena, pomoću OpenFOAM biblioteke računalnih programa. Dobiveni rezultati uspoređeni su s rezultatima eksperimenta. Numeričke simulacije izvedene su za više inačica geometrije prostorije i istrujnog difuzora, dok su za usporedbu s rezultatima eksperimenta korištene dvije.

Ključne riječi: klimatizacija, računalna dinamika fluida, toplinska ugodnost, OpenFOAM

SUMMARY

Air-conditioning systems are used for almost every modern office or other purpose building that accommodates a larger number of people. In order to maintain the required conditions inside the room, it is necessary to inject supply air and drain out exhaust air from the room.

Air can be injected into the room in different ways, resulting with airflow of different properties. The air flow properties inside the room significantly affect thermal comfort of people inside the residence zone.

In this work, numerical simulations were used for the calculation of flow properties inside a room of prescribed geometry. Simulations were performed by applying Finite Volume Method using OpenFOAM software package. The obtained results are compared with the results of experiments. Simulations were performed for multiple variants of room and exhaust diffuser geometry, two of which were used in comparisons with experimental results.

Key words: Air Conditioning, Computational Fluid Dynamics, Thermal Comfort, OpenFOAM

1. UVOD

1.1. Istrujni otvori

Zračni sustavi klimatizacije za dobavu zraka u prostor koriste distributere zraka u raznim izvedbama. Osnovne izvedbe su: stropni distributeri, vrtložni distributeri, podni distributeri, indukcijski distributeri, rešetke, linijski distributeri te mlazne sapnice. Svaka izvedba ima svoje područje primjene ovisno o zahtjevima i tipu prostora. Sam tip i položaj istrujnog otvora može značajno utjecati na parametre toplinske ugodnosti u zoni boravka. Općenito je manji postotak nezadovoljnih (PPD – *eng. predicted percentage of dissatisfied*) kod većih brzina strujanja toplog zraka. Kod većih brzina strujanja hladnog zraka u zoni boravka postotak nezadovoljnih je veći.. U sezoni hlađenja treba smanjiti brzinu strujanja zraka i odabrati poziciju i vrstu istrujnog otvora tako da brzina strujanja na ulasku u zonu boravka bude u zadovoljavajućim granicama. To je ostvarivo povećanjem površine istrujnog otvora, no tada nam raste količina materijala potrebnog za proizvodnju distributera. Povećanjem distribucijskog otvora povećava se i prostor potreban za ugradnju koji je ograničen njegovim dimenzijama i zahtjevima arhitekta. Ukoliko je prostor za ugradnju ograničen, potrebno je osigurati zadovoljavajuće uvjete izborom odgovarajućeg istrujnog otvora. [1]

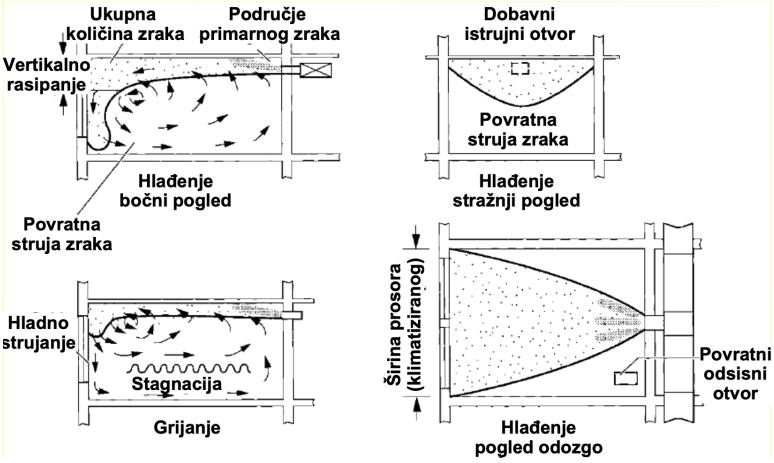
1.2. Podjela otvora prema ASHRAE

ASHRAE podjela dijeli istrujne otvore na 5 grupa:

- Grupa A
- Grupa B
- Grupa C
- Grupa D
- Grupa E

1.2.1. Grupa A

Istrujni otvori su smješteni na ili blizu stropa i ubacuju zrak horizontalno.



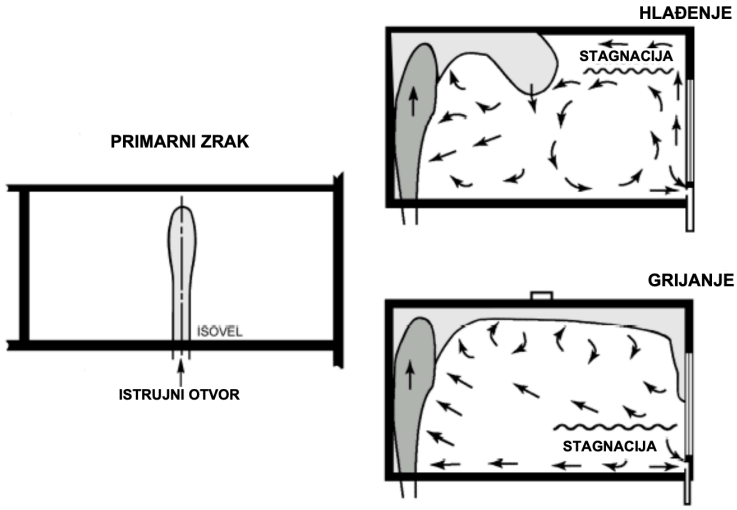
Slika 1. Primjer strujanja zraka istrujnih otvora grupe A [1]

Tip otvora grupe A je pogodan za sezonu hlađenja i može se koristiti za velike protoke kondicioniranog zraka s velikim temperaturnim razlikama. Prilikom ubacivanja toplog zraka u sezoni grijanja postoji opasnost od stagnacije zraka pri podu. Topli zrak zbog sile uzgona uslijed razlika u gustoći prirodno želi strujati prema gore, stoga je potrebno pravilno odabrati brzinu strujanja zraka na izlazu otvora.

Prilikom premalog dometa mlaza postoji opasnost da kondicionirani zrak direktno pada u zonu boravka, što prouzrokuje veće zone stagnacije u prostoru.

1.2.2. Grupa B

Istrujni otvori su smješteni u ili blizu poda i ubacuju zrak vertikalno u uskom mlazu.

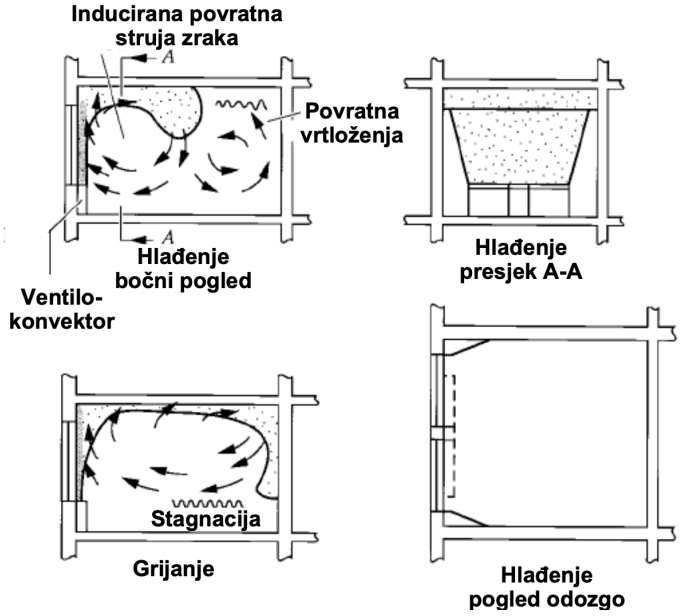


Slika 2. Primjer strujanja zraka istrujnih otvora grupe B [1]

Istrujni otvori tipa B trebaju dovoljan domet mlaza kako bi kondicionirani zrak dospio do zone boravka, u suprotnom kondicionirani zrak krene propadati prije zone boravka što utječe na toplinsku ugodnost u prostoru. Istrujni otvori ovog tipa mogu podnijeti relativno velike protoke s jednolikom temperaturom i kretanjem zraka. Pogodno je ugraditi istrujne otvore ovog tipa na mjestima najvećih toplinskih opterećenja i gubitaka.

1.2.3. Grupa C

Istrujni otvori su smješteni u ili blizu poda i ubacuju zrak vertikalno u širokom mlazu.

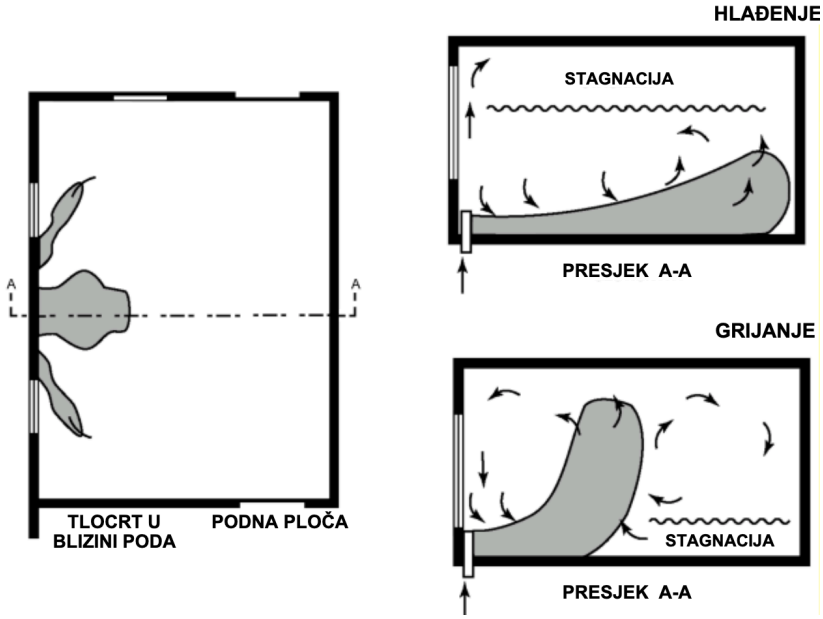


Slika 3. Primjer strujanja zraka istrujnog otvora grupe C [1]

Otvori tipa C su pogodni za grijanje i u uvjetima vrlo velikih toplinskih gubitaka. Karakteristike ukupnog zraka i zraka u prostoriji su slične onima u grupi B, razlika je u zonama stagnacije. Manja zona stagnacije pojavljuje se za vrijeme sezone grijanja, a za vrijeme sezone hlađenja se pojavljuje veća zona stagnacije. Difuzijsko djelovanje izlaznih otvora otežava strujanje hladnog zraka koji se tada povlači prema primarnom zraku, umjesto da se širi prema stropu.

1.2.4. Grupa D

Istrujni otvori su smješteni u ili blizu poda i ubacuju zrak horizontalno.

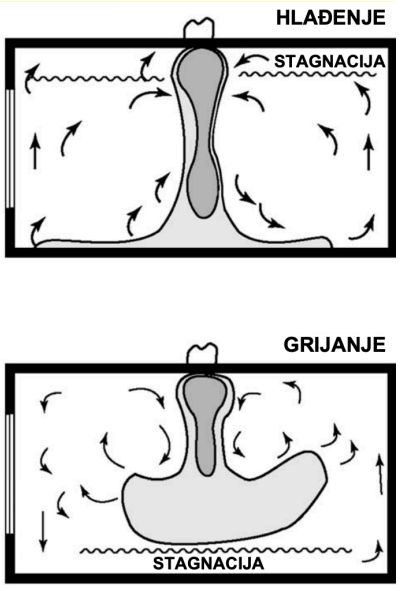


Slika 4. Primjer strujanja zraka istrujnog otvora grupe D [1]

Istrujni otvori tipa D se ne preporučaju za sezonu hlađenja zbog velike zone stagnacije, ali i zbog toplinske ugodnosti. Ovi istrujni otvori usmjeravaju ukupni zrak direktno u zonu boravka što iznimno negativno djeluje na toplinsku ugodnost za vrijeme hlađenja. U sezoni grijanja potrebno je prilagoditi brzinu istrujavanja kako bi brzina strujanja u zoni boravka bila zadovoljavajuća.

1.2.5. Grupa E

Istrujni otvori su smješteni na ili blizu stropa i ubacuju zrak horizontalno.



Slika 5. Primjer strujanja zraka istrujnog otvora grupe E [1]

U sezoni hlađenja ukupni zrak se ubacuje horizontalno prema podu te se zadržava na podu tvoreći zone stagnacije pri stropu. Korištenjem ovog tipa istrujnih otvora za sezonu grijanja treba obratiti pozornost na domet mlaza kako bi kondicionirani zrak dosegao pod i time smanjujući zonu stagnacije u blizine poda. [1]

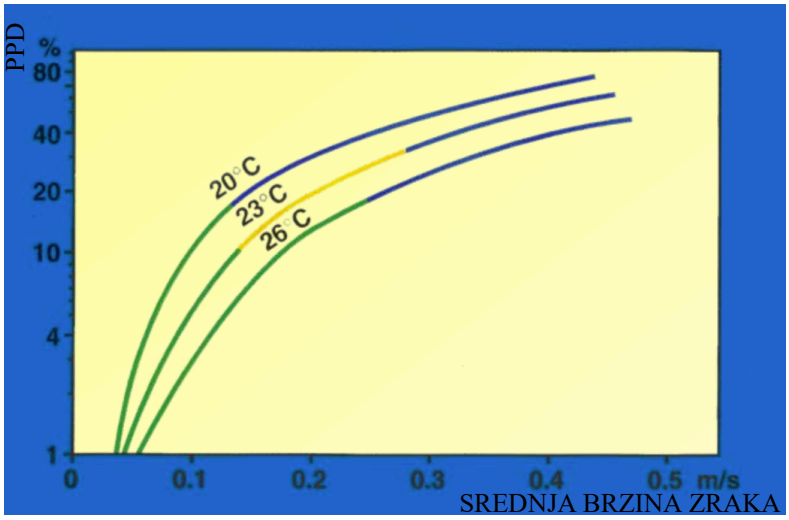
1.3. Toplinska ugodnost

Toplinska ugodnost je definirana s 8 faktora toplinske ugodnosti:

1. Temperatura zraka
2. Temperatura ploha
3. Relativna vlažnost
4. Brzina strujanja
5. Razina odjevenosti
6. Razina fizičke aktivnosti
7. Kvaliteta zraka
8. Buka

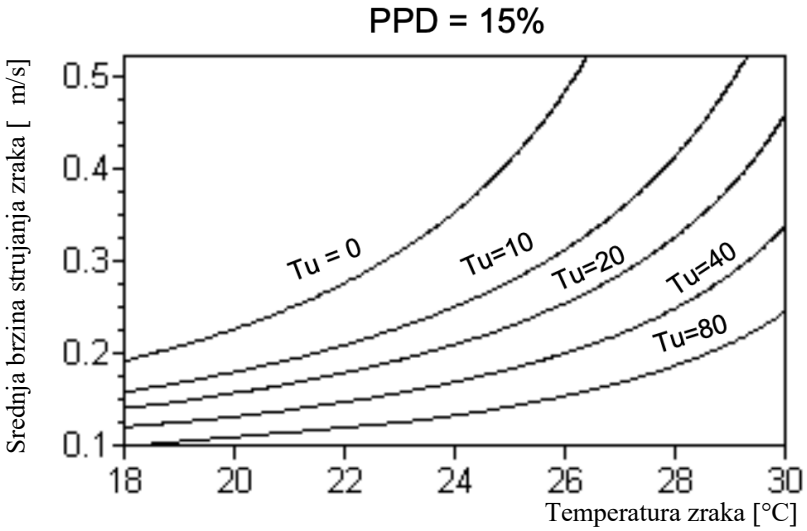
1.3.1. Brzina strujanja

Iznimno veliki utjecaj na toplinsku ugodnosti ima brzina strujanja zraka. U pravilu korisnici bolje podnose brže strujanje zraka više temperature nego brzo strujanje zraka niže temperature.



Slika 6. Utjecaj brzine strujanja i temperature zraka na PPD [1]

Iz Slike 6. je vidljiv predviđeni postotak nezadovoljnih (PPD) koji je značajno veći za istu brzinu strujanja hladnijeg zraka u odnosu na topliji zrak. Uz brzinu strujanja i temperaturu kondicioniranog zraka na toplinsku ugodnost utječe i intenzitet turbulencija (oznaka *Tu* na slici 7.). Jedna od zadaća sustava grijanja, ventilacije i klimatizacije je jednolika brzina strujanja u prostoru i vremenu. [1]



Slika 7. Utjecaj intenziteta turbulencija na PPD [1]

Ostali faktori toplinske ugodnosti nemaju utjecaja na daljnja razmatranja.

1.4. Odabir načina ubacivanja kondicioniranog zraka

Prilikom projektiranja GViK sustava vrlo je važno uzeti u obzir dimenzije prostorije, dimenzije zone boravka te namjenu prostora te pravilno odabrati način ubacivanja kondicioniranog zraka. U odlomku 1.2. su prikazani mogući načini cirkulacije zraka unutar prostora koji ne ovise samo o položaju istrujnog otvora već ovise i o uređaju koji ubacuje kondicionirani zrak. U daljnjim poglavljima je dan kratak uvod u najbitnije teme mehanike fluida kako bi se ukratko opisale pojave prilikom strujanja fluida.

Numeričkom simulacijom je pokazano kako i male promjene u geometriji istrujnih otvora mogu negativno ili pozitivno utjecati na toplinsku ugodnost u prostoru. Toplinsku ugodnost nemoguće je simulirati za općeniti slučaj, već se ona se procjenjuje posebno za svaku prostoriju određene namjene. U daljnjim razmatranjima se obraća pozornost samo na promjene strujanja uslijed promjene geometrije, daljnjom implementacijom ovog modela u prostoriju određene namjene se može zaključivati kako će to utjecati na toplinsku ugodnost u prostoru.

2. TEORIJSKE OSNOVE

Proučavanje gibanja fluida i sile koje djeluju na fluid se temelji na rješavanju matematičkih modela strujanja. Matematički modeli strujanja zapisani su u obliku sustava nelinearnih parcijalnih diferencijalnih jednadžbi koje je često u slučaju praktičnih primjena, nemoguće riješiti analitički. Danas se mnogi problemi mehanike fluida rješavaju koristeći numeričke simulacije, a eksperimentima se validiraju rezultati simulacija i poboljšavaju matematički i numerički modeli. Eksperimenti se često primjenjuju i u slučajevima gdje su ekonomičniji ili gdje je nemoguće simulacijama dobiti zadovoljavajuće rezultate.

Tok zraka kroz ventilacijsku rešetku i promatranu prostoriju se može smatrati nestlačivim, viskoznim i izrazito turbulentnim strujanjem.

2.1. Osnovne jednadžbe mehanike fluida

Gibanje fluida opisano je trima osnovnim zakonima mehanike fluida:

- Jednadžba očuvanja mase
- Jednadžba očuvanja količine gibanja
- Zakon očuvanja energije

Zakon očuvanja mase opisan je jednadžbom kontinuiteta:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho v_j)}{\partial x_j} = 0 \qquad \textbf{(1)}$$

gdje je ρ polje gustoće, a v_j polje brzine fluida. Jednadžbu kontinuiteta pojednostavljujemo pretpostavkom nestlačivosti fluida, kada nam gustoća potaje konstantna kroz prostor i vrijeme te se dobiva sljedeća formulacija jednadžbe kontinuiteta:

$$\frac{\partial v_j}{\partial x_j} = 0 \qquad \textbf{(2)}$$

Zakon očuvanja količine gibanja opisan je Navier-Stokesovim jednadžbama:

$$\frac{\partial(\rho v_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_i v_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(-p\delta_{ij} + \Sigma_{ji}\right) + \rho f_i, \quad \textbf{(3)}$$

Σ_{ji} predstavlja simetrični tenzor viskoznih naprezanja. Simetrični tenzor se može raspisati prema Newtonovom zakonu viskoznosti kao:

$$\Sigma_{ji} = \mu\left(\frac{\partial v_j}{\partial x_i} + \frac{\partial v_i}{\partial x_j}\right) - \frac{2}{3}\mu\frac{\partial v}{\partial x}\delta_{ji} \quad \textbf{(4)}$$

2.2. Turbulencija

Turbulencija je pojava nepravilnog i nepredvidivog kretanja fluida na određenom području i u određenom vremenskom razdoblju, pri čemu se čestice gibaju kaotično. Turbulentno strujanje je najčešći oblik strujanja u prirodi te ga karakterizira promjena fizikalnih veličina u vremenu i prostoru, izrazita nestacionarnost i miješanje čestica fluida na razini većih i manjih skala. Miješanje čestica pojačava difuzijski karakter strujanja s posljedicom povećanja disipacije energije.

Strujanje fluida se dijeli na laminarno i turbulentno prema vrijednostima Reynoldsovog broja, gdje je pri visokim vrijednostima Reynoldsovog broja strujanje u većini slučajeva turbulentno. Reynoldsov broj predstavlja omjer inercijskih i viskoznih sila.

$$Re = \frac{\rho v x}{\mu} \quad \textbf{(5)}$$

Reynoldsov broj je bezdimenzijska značajka gdje $\boldsymbol{\rho}$ predstavlja gustoću fluida, $\boldsymbol{v}$ brzinu fluida, $\boldsymbol{x}$ karakterističnu duljinu, a μ dinamičku viskoznost fluida.

Strujanjem fluida uz stijenku formira se granični sloj u kojem je brzina čestica na stijenki jednaka nuli. Unutar graničnog sloja brzina čestica fluida se mijenja od nule do brzine čestica fluida neporemećene struje što prouzrokuje velike gradijente brzina, a time i viskozne sile koje ovise o gradijentu brzine. Veliki gradijenti brzine u graničnom sloju prouzrokuju strmije prijelaze u profilima brzine, samim time i veće tangencijalno naprezanje.

Turbulentno strujanje pokazuje pulsacije čestica u određenom vremenskom intervalu. Karakter turbulentnog strujanja otežava upotrebu numeričkih simulacija zbog zahtjeva na prostornu i vremensku podjelu koja mora biti toliko fina da se razluče i najmanje amplitude turbulentnog strujanja, i najbrža promjena fizikalnih veličina u vremenu. Rješavanje takvog strujanja numeričkim simulacijama bi rezultiralo velikim zahtjevima za memorijski prostor i računalnu snagu.

Skup rezultata koji bi se dobio u obliku zapisa polja u svakom od velikog broja vremenskih koraka nije upotrebljiv u inženjerskoj praksi te se stoga koriste Reynoldsove jednadžbe koje su skup vremenski osrednjenih Navier-Stoksovih jednadžbi, odnosno jednadžbe kontinuiteta i jednadžbe količine gibanja. Krajnja jednadžba količine gibanja je navedena u sljedećem retku, a sam postupak izvođenja jednadžbe u [4].

$$\frac{\partial(\rho\overline{v_\iota})}{\partial t}+\frac{\partial\left(\rho\overline{v_\iota v_j}\right)}{\partial x_j}=-\frac{\partial\bar{p}}{\partial x_j}+\frac{\partial}{\partial}\left[\mu\left(\frac{\partial\overline{v_\iota}}{\partial x_j}+\frac{\partial v_j}{\partial x_j}\right)-\rho\overline{v_\iota' v_j'}\right], \tag{6}$$

U Reynoldsovom skupu jednadžbi nalazi se i jednadžba kontinuiteta za osrednjeno strujanje:

$$\frac{\partial\overline{v_j}}{\partial x_j}=0 \tag{7}$$

U jednadžbi (6) se javlja član $-\rho\overline{v_\iota' v_j'}$ kao predstavnik pulsirajućeg strujanja. Član se još naziva turbulentnim ili Reynoldsovim naprezanjima koji predstavlja simetričan tenzor sa šest nepoznanica.

$$-\rho\overline{v_\iota' v_j'}=\begin{vmatrix}-\rho\overline{v_1' v_1'} & -\rho\overline{v_1' v_2'} & -\rho\overline{v_1' v_3'}\\ -\rho\overline{v_2' v_1'} & -\rho\overline{v_2' v_2'} & -\rho\overline{v_2' v_3'}\\ -\rho\overline{v_3' v_1'} & -\rho\overline{v_3' v_2'} & -\rho\overline{v_3' v_3'}\end{vmatrix} \tag{8}$$

Broj jednadžbi i broj nepoznanica nije jednak te modeli turbulencije usklađuju broj jednadžbi i nepoznanica.

2.3. Modeli turbulencije

U ovome radu, koristi se model turbulencije koji modelira tenzor Reynoldsovih naprezanja pomoću Boussinesqove hipoteze:

$$-\rho\overline{v_i'v_j'} = \mu_t\left(\frac{\partial\overline{v}_i}{\partial x_j}+\frac{\partial\overline{v}_j}{\partial x_i}\right)-\frac{2}{3}\rho\bar{k}\delta_{ij}\,, \tag{9}$$

gdje je μ_t turbulentna viskoznost koja ne predstavlja fizikalno svojstvo fluida nego je funkcija strujanja, a u laminarnom strujanju poprima vrijednost nula. Član $\bar{k} = \overline{v_i'v_i'}/2$ jednadžbe predstavlja kinetičku energiju turbulencije fluida. Jednadžba (9) se naziva newtonovski model turbulencije. Boussinesqovom hipotezom tenzor Reynoldsovih naprezanja modeliramo sa jednim poljem nepoznate turbulentne viskoznosti i time smanjujemo broj nepoznanica. Uvrštavanjem Boussinesqove hipoteze u Reynoldosove jednadžbe one poprimaju sljedeći oblik:

$$\frac{\partial\overline{v}_j}{\partial x_j} = 0 \tag{10}$$

$$\frac{\partial(\rho\overline{v}_i)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho\overline{v_iv_j})}{\partial x_j} = -\frac{\partial\left(\bar{p}+\rho\frac{2}{3}\bar{k}\right)}{\partial x_j}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu+\mu_t\left(\frac{\partial\overline{v}_i}{\partial x_j}+\frac{\partial v_j}{\partial x_i}\right)\right], \tag{11}$$

Razlika Reynoldsovih i polaznih Navier-Stoksovih jednadžbi je u pojavljivanju vremenski osrednjenih veličina. Umjesto tlaka se pojavljuje efektivni tlak, umjesto viskoznosti fluida efektivna viskoznost. U Reynoldsovim jednadžbama nemamo više članova koji opisuju pulsacije, a kako bi se dobio sustav s jednakim brojem nepoznanica i jednadžbi potrebno je modelirati turbulentnu viskoznost.

Na temelju Boussinesqove ideje modeliranja turbulentnih naprezanja slično kao i viskozna naprezanja, modelira se i turbulentna viskoznost. Viskoznost fluida razmjerna je gustoći fluida, slobodnoj putanji molekula i brzini molekula.

$$\mu_t = \rho l_m v_t \,, \tag{12}$$

gdje je ρ gustoća, l_m je put miješanja čestica fluida u turbulentnom strujanju, v_t karakteristična brzina turbulentnih pulsacija. Iz jednadžbe (12) modelima turbulencije se opisuju članovi l_m i v_t. Često korišten zbog svojeg širokog spektra primjenjivost je model $k - \omega$ *SST.*

2.4. *k-ω* SST model turbulencije.

Modelom *k-ω* SST (eng. „k-omega Shear Stress Transport“) se rješavaju dvije transportne jednadžbe, jednadžba kinetičke energije *k* i specifične brzine disipacije kinetičke energije turbulencije *ω*. *k-ω* SST model u sebi sadrži dva dobro poznata modela: *k-ω* model, koji daje dobre rezultate u području graničnog sloja i osjetljiv je na razinu turbulencije u slobodnoj struji i model turbulencije *k*-ε, koji daje vrlo dobre rezultate u zonama udaljenim od same stjenke i nema osjetljivost poput *k-ω* modela.

Jednadžbe koje prikazuju *k-ω* SST model su: [9]

- Turbulentna viskoznost:

$$v_t = \frac{a_1 k}{max(a_1 \omega, SF_2)} \tag{13}$$

- Turbulentna kinetička energija:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k - \beta^* k\omega + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(v + \sigma_k v_t)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] \tag{14}$$

- Specifična brzina disipacije :

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha S^2 - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(v + \sigma_\omega v_t)\frac{\partial \omega}{\partial x_i}\right] + 2(1 - F_1)\sigma_{\omega^2}\frac{1}{\omega}\frac{\partial k}{\partial x_i}\frac{\partial \omega}{\partial x_i} \quad \textbf{(15)}$$

- Koeficijenti i pomoćni izrazi jednadžbi:

$$F_2 = \tanh\left[\left[max\left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500v}{y^2 \omega}\right)\right]^2\right] \quad \textbf{(16)}$$

$$P_k = min\left(\tau_{ij}\frac{\partial U_i}{\partial x_j}, 10\beta^* k\omega\right) \quad \textbf{(17)}$$

$$F_1 = \tanh\left\{\left\{min\left[max\left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500v}{y^2 \omega}\right), \frac{4\sigma_{\omega^2} k}{CD_{k\omega} y^2}\right]\right\}^4\right\} \quad \textbf{(18)}$$

$$CD_{k\omega} = max\left(2\rho\sigma_{\omega^2}\frac{1}{\omega}\frac{\partial k}{\partial x_i}\frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-10}\right) \quad \textbf{(19)}$$

$$\Phi = \Phi_1 F_1 + \Phi_2(1 - F_2) \quad \textbf{(20)}$$

$\boldsymbol{\alpha_1}$	$\boldsymbol{\alpha_2}$	$\boldsymbol{\beta_1}$	$\boldsymbol{\beta_2}$	$\boldsymbol{\beta^*}$	$\boldsymbol{\sigma_{k1}}$	$\boldsymbol{\sigma_{k2}}$	$\boldsymbol{\sigma_{\omega 1}}$	$\boldsymbol{\sigma_{\omega 2}}$
$\frac{5}{9}$	0.44	$\frac{3}{40}$	0.0828	$\frac{9}{100}$	0.85	1	0.5	0.865

Tablica 1: Koeficijenti k − ω SST modela turbulencije [9]

2.5. Turbulentni granični sloj

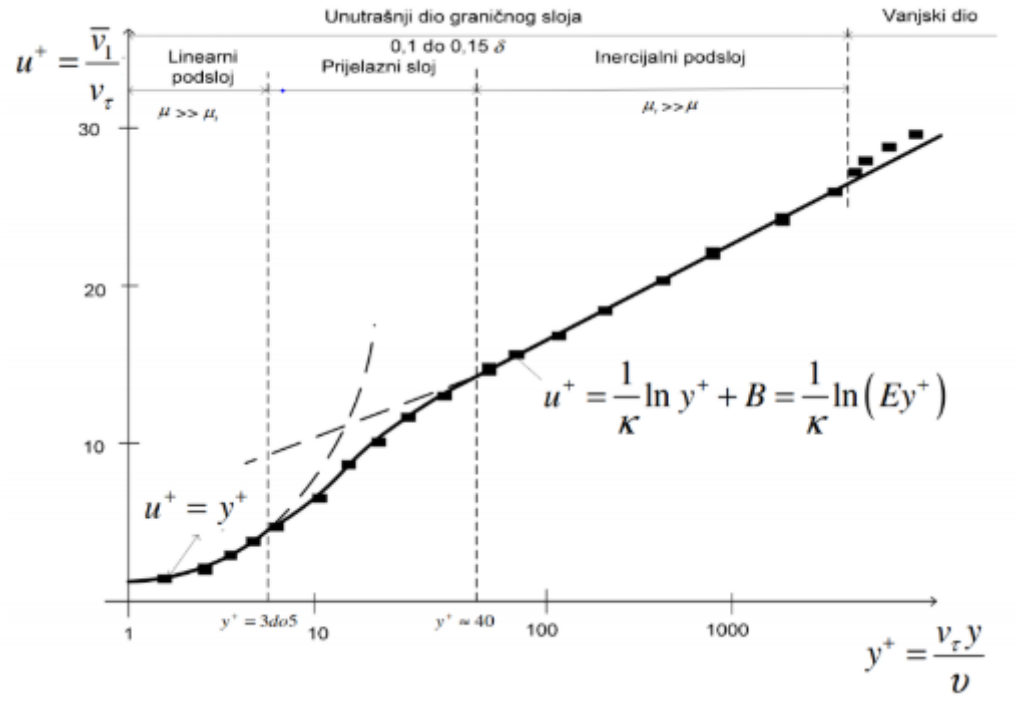
Turbulentno strujanje u blizini stjenke drugačije je nego u ostalim dijelovima domene. Čestice fluida koje pulsiraju ne mogu slobodno pulsirati zbog nepropusne stjenke u blizini. Ukoliko se čestice ne mogu gibati slobodno odnosno turbulentno može se zanemariti turbulentna viskoznost, dok udaljavanjem od stijenke čestice dobivaju više prostora za turbulentno gibanje. Ovime su definirana tri podsloja graničnog sloja.

1. Viskozni podsloj (y+ < 5)
2. Prijelazni podsloj (5 < y+ <30)
3. Inercijski podsloj (y+ > 30)

y+ predstavlja normaliziranu udaljenost od zida.

$$y^+ = \frac{C_\mu^{1/4} k^{1/2}}{\nu} y, \tag{21}$$

Unutar inercijskog podsloja viskozna i turbulentna viskoznost su zamijenile uloge, turbulentna postaje većeg reda veličine i nezanemariva, a molekularna postaje zanemariva. Između viskoznog i inercijskog podsloja se nalazi prijelazni podsloj u kojemu su viskozna i turbulentna viskoznost podjednakog reda veličine. [4]



Slika 8. Profil bezdimenzijske brzine unutar graničnog sloja [4]

Tijekom izrade ovog rada, pristupilo se ispitivanju različitih aspekata promatranog problema istrujavanja zraka kroz stropni vrtložni difuzor u prostoriju. Pri tome su korišteni i različiti pristupi modeliranju turbulencije u području graničnog sloja. Dobra odlika *k-w* SST modela i njegove implementacije u računalnom paketu OpenFOAM jest ta da omogućuje različit pristup modeliranju turbulencije u području graničnog sloja i što daje dobre rezultate i u slučaju fine diskretizacije područja graničnog sloja (u slučaju razlučivanja viskoznog i prijelaznog podsloja). Suprotno navedenom, jednadžbe *k*-e modela turbulencije vrijede samo za područja s visokom vrijednošću turbulentne viskoznosti, te u drugim slučajevima ne daju zadovoljavajuće rezultate.

U skladu s navedenim, ovisno o finoći diskretizacije i uvjetima strujanja, na pojedinim područjima geometrije pri modeliranju turbulencije primjenjivane su i odgovarajuće zidne funkcije (tzv. *Low-Re* pristup u slučaju diskretizacije takve da udaljenost težišta 1. sloja volumena od stijenke daje $y^+<6$, posebna funkcija za prijelazni slučaj $0<y^+<30$ te standardna zidna funkcija u slučaju $y^+>30$).

3. METODA KONAČNIH VOLUMENA

U poglavlju teorijske osnove je dan kratak osvrt na fiziku problema i na parcijalne diferencijalne jednadžbe koje matematički opisuju pojave prilikom strujanja fluida. Navedene parcijalne diferencijalne jednadžbe nemaju analitičko rješenje te je potrebno koristiti numeričke metode koje transformiraju parcijalne diferencijalne jednadžbe u sustav linearnih algebarskih jednadžbi.

U razmatranju strujanja zraka korištena je metoda konačnih volumena. Metodom konačnih volumena promatrani kontrolni volumen dijelimo na konačan broj volumena. U svakom od konačnih volumena se nalaze vrijednosti fizikalnih veličina te svi prije navedeni osnovni zakoni mehanike fluida moraju biti zadovoljeni. Transformacija jednadžbi matematičkog modela iz oblika parcijalnih diferencijalnih jednadžbi u algebarski oblik bit će dana na primjeru opće transportne jednadžbe, odnosno konvekcijsko-difuzijske jednadžbe.

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho v_j\phi)}{\partial x_j}-\Gamma\frac{\partial^2\phi}{\partial x_j\partial x_j}=\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial}\left(\rho v_j\phi-\Gamma\frac{\partial}{\partial}\right)=S_\phi\,, \qquad \textbf{(22)}$$

Prvi član opisuje lokalnu promjenu fizikalnog svojstva, drugi član opisuje promjenu uslijed konvektivnog prijenosa, a treći član opisuje promjenu uslijed difuzije. S_ϕ predstavlja izvorski član, odnosno izvor ili ponor fizikalne veličine.

Kako bi jednadžbu diskretizirali, odnosno primijenili ju na svaki konačni volumen, potrebno ju je integrirati i primijeniti Gaussov teorem:

$$\frac{d}{dt}\int_{\Delta V}\rho\phi dV=-\int_{\Sigma\Delta S}\left(\rho v_j\phi-\Gamma\frac{\partial\phi}{\partial x_j}\right)n_j dS+\int_{\Delta V}S_\phi dV \qquad \textbf{(23)}$$

Lijevi član jednakosti predstavlja brzinu promjene sadržaja fizikalnog svojstva u kontrolnom volumenu. Prvi član desne strane predstavlja zbroj konvektivnog i difuzijskog protoka fizikalnog svojstva kroz granice, a drugi član desne strane predstavlja izvor u konačnom volumenu.

Volumenske i površinske integrale potrebno je aproksimirati prema teoremu o srednjoj vrijednosti. Pod pretpostavkom konstantne gustoće dobivamo sljedeći izraz:

$$\int_{\Delta V}\phi dV=\overline{\phi_{\Delta V}}\,\Delta V\,, \qquad \textbf{(24)}$$

gdje je srednja vrijednost fizikalne veličine ϕ unutar konačnog volumena označena sa $\overline{\phi_{\Delta V}}$. Uzevši u obzir male veličine konačnih volumena pretpostavlja se linearna raspodjela fizikalne veličine te se tada može primijeniti raspis po Taylorovom redu u centralnom čvoru fizikalne veličine.

$$\overline{\phi_{\Delta V}}\Delta V = \left[\phi_c + \left.\frac{\partial \phi}{\partial x_j}\right|_C (x_j^T - x_j^C)\right] \Delta V \tag{25}$$

Iz gornje jednadžbe promatrajući članove u zagradi na desnoj strani za slučaj jednakih iznosa vektora položaja težišta kontrolnog volumena x_j^T i vektora položaja centralnog čvora x_j^C, veličinu ϕ je moguće odrediti aproksimacijom fizikalne veličine u centralnom čvoru. Na temelju iznesenog se aproksimira član lokalne promjene u centralnom čvoru:

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{dt}} \int_{\Delta V} \rho\phi \,\mathrm{dV} \approx \rho \frac{\mathrm{d}\phi_C}{\mathrm{d}t} \tag{26}$$

Integral izvorskog člana se aproksimira na sličan način:

$$\int S_\phi \mathrm{d}V \approx S_C \Delta V \tag{27}$$

Potrebno je još aproksimirati prvi član desne strane jednakosti iz (23). Taj član u sebi sadrži protoke fizikalnog svojstva uslijed konvekcije i difuzije kroz površinu konačnog volumena. Vektor konvekcijskog toka je definiran kao $\rho v_j \phi$, a vektor difuzijskog toka kao $-\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_j}$. Ta dva vektora u općem slučaju nisu kolinearna, a njihov zbroj čini vektor J_j. Nadalje, na protok fizikalne veličine utječe samo normalna komponenta vektora $J_j n_j$

$$\Delta J_n = \int_{\Delta S} \left(\rho v_j \phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_j}\right) = \left[\rho \overline{(v_n \phi)}_{\Delta S} - \Gamma \left(\overline{\frac{\partial \phi}{\partial n}}\right)_{\Delta S}\right] \Delta S \tag{28}$$

Član $\overline{(v_n \varphi)}_{\Delta S}$ se može raspisati kao umnožak srednjih vrijednosti normale komponente brzine i vrijednosti u težištu *n* površine *ΔS.* Istim principom se zapisuje i srednja vrijednost normalne derivacije polja ϕ u točki n $\left(\overline{\frac{d\phi}{dn}}\right)_{\Delta S} \approx \left.\frac{\partial \phi}{\partial n}\right|_n$. Potrebno je još uvesti bezdimenzijsku koordinatu $\tilde{n} = n/\Delta n$ gdje je *Δn* udaljenost između čvora C koji predstavlja centralni čvor konačnog

volumena i čvora N koji predstavlja središte susjednog konačnog volumena, tada prethodna formula ima slijedeći oblik:

$$\Delta J_n = \rho v_{n,n} \Delta S \phi_n - \frac{\Gamma \Delta S}{\Delta n} \frac{\partial \phi}{\partial \tilde{n}}\bigg|_n = F_n \phi_n - D_n \frac{\partial \phi}{\partial \tilde{n}}\bigg|_n \tag{29}$$

Izraz $F_n = \rho v_{n,n} \Delta S$ se naziva jačina konvekcije, a veličina $D_n = \frac{\Gamma \Delta S}{\Delta n}$ jačina difuzije. Uvrštavanjem izraza (26) i (27) u (23)dobiva se sljedeća jednadžba:

$$\rho \frac{d\varphi_c}{dt} \Delta V = -\sum_{nb=1}^{N_{nb}} \left(F_n - D_n \frac{\partial \varphi}{\partial \tilde{n}}\bigg|_n \right)^{nb} + S_c \Delta V \tag{30}$$

U jednadžbi (30) *nb* označava sumiranje po svim N_{nb} stranicama konačnog volumena. Numeričkim postupcima računaju se i zapisuju samo vrijednosti ϕ u čvorovima dok se vrijednosti na stranica aproksimiraju pomoću vrijednosti u glavnim čvorovima. Općenito, postupak u kojem vrijednosti na nekom mjestu aproksimiramo pomoću vrijednosti u glavnim čvorovima se naziva shema diferencije ili numerička shema. Ako se primijeni numerička shema koja će koristiti vrijednosti u glavnim čvorovima dobiva se sljedeći izraz:

$$\Delta J_n = F_n - D_n \frac{\partial \phi}{\partial \tilde{n}}\bigg|_n = F_n \phi_c + a_N (\phi_c - \phi_N) \tag{31}$$

Koeficijent a_N ovisi o primijenjenoj shemi diferencije. Jednadžba (31) naknadnim sređivanjem, linearizacijom i primjenom određene metode za vremensku diskretizaciju poprima sljedeći oblik:

$$a_c \phi_c = \sum_{nb=1}^{N_{nb}} \left[a_N^{nb} \phi_N^{nb} \right] + b \tag{32}$$

Dobivena jednadžba (32) je linearna algebarska jednadžba dobivena diskretizacijom integrala po konačnom volumenu. Prikazana jednadžba vrijedi za jedan konačan volumen te njenom primjenom na svaki konačni volumen dobivamo sustav linearnih algebarskih jednadžbi. Rješavanjem sustava dobivamo nepoznate vrijednosti u središtima konačnih volumena. Sustav jednadžbi i nepoznanica time je jednoznačno određen te je broj nepoznanica određen broju konačnih volumena . Sustav je moguće zapisati u matričnom obliku:

$$[A_{ji}][\phi_i] = [b_j] \quad \textbf{(33)}$$

Matrica $[A_{ji}]$ označava matricu sustava, vektor $[\phi_i]$ označava vektor nepoznatih vrijednosti u čvorovima u vektoru $[b_j]$ se nalaze sve poznate veličine koje zadajemo, odnosno rubni uvjeti. [5]

4. PRORAČUNI

U sklopu ovog rada provedene su računalne simulacije na više inačica geometrijskih modela, modela turbulencije i rubnih uvjeta. Na početku izrade ovog rada, obavljena su ispitivanja prikladnosti ukupnog numeričkog modela spram tražene usporedbe s rezultatima eksperimenta i predviđenog raspona rada.

Sukladno saznanjima dobivenim prilikom ovih ispitivanja, sve simulacije koje se opisuje u nastavku rada, provedene su primjenom programa za rješavanje stacionarnih problema nestlačivog strujanja simpleFoam i ostalih uslužnih programa biblioteke OpenFOAM.

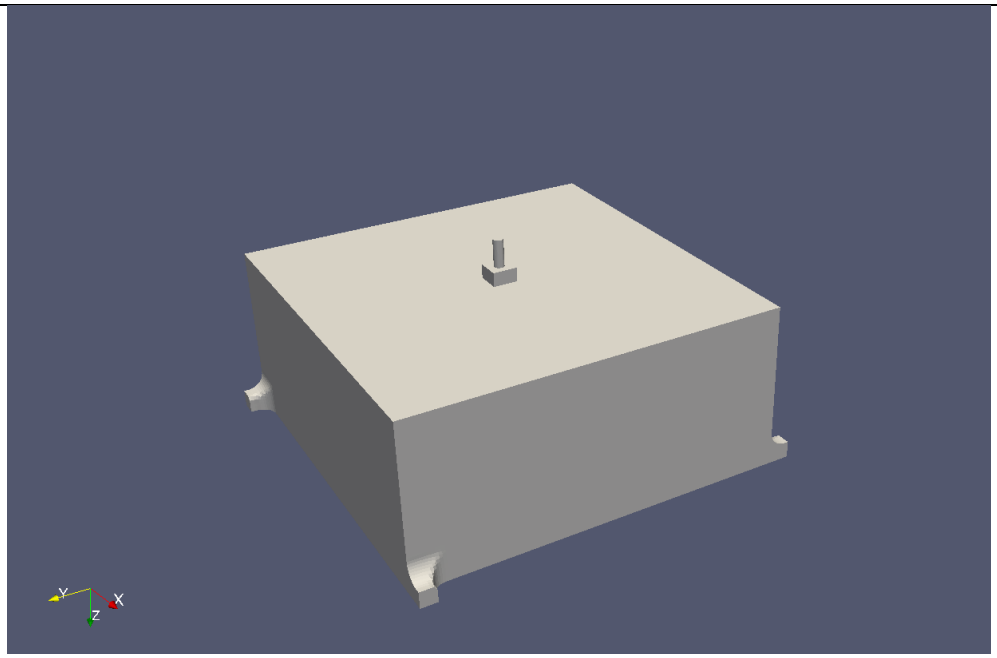
Geometrijski modeli koji se koriste u ovome radu temelje se na geometriji vrtložnog radijalnog difuzora [7] za koji su mjerenja provedena, analizirana i obrađena u [2].

4.1. Geometrijski model

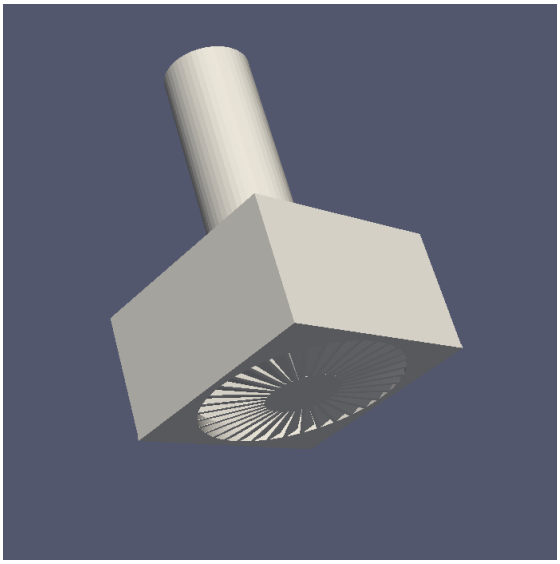
Svi geometrijski modeli područja proračuna izraženi su u programskom paketu *Salome_Meca V2016.* Dimenzije vrtložnog radijalnog difuzora su preuzete iz kataloga proizvođača [7], a dimenzije prostorije iz doktorske disertacije [2]. Dimenzije prostorije iznose 10x10x4 m, a sam vrtložni radijalni difuzor je smješten centralno, na strop prostorije. Na samu prostoriju su dodana četiri otvora za izlaz zraka iz prostorije koji su se tijekom izvedbi pojedinih simulacija mogli jednostavno aktivirati i isključiti (prikazano na slici 9.).

Uz ovako zadanu geometriju prostorije i smještaj difuzora, koristile su se dvije glavne inačice anemostata (vrtložnog radijalnog difuzora - pokrovne ploče difuzora s istrujnim lopaticama, slika 10). U preliminarnim simulacijama korištena je geometrija rekonstruirana pomoću kataloga proizvođača [7], dok su se za potrebe usporedbe s rezultatima mjerenja koristila varijanta izrađene prema točnim radioničkim nacrtima proizvođača, ustupljenim od strane autora rada [2].

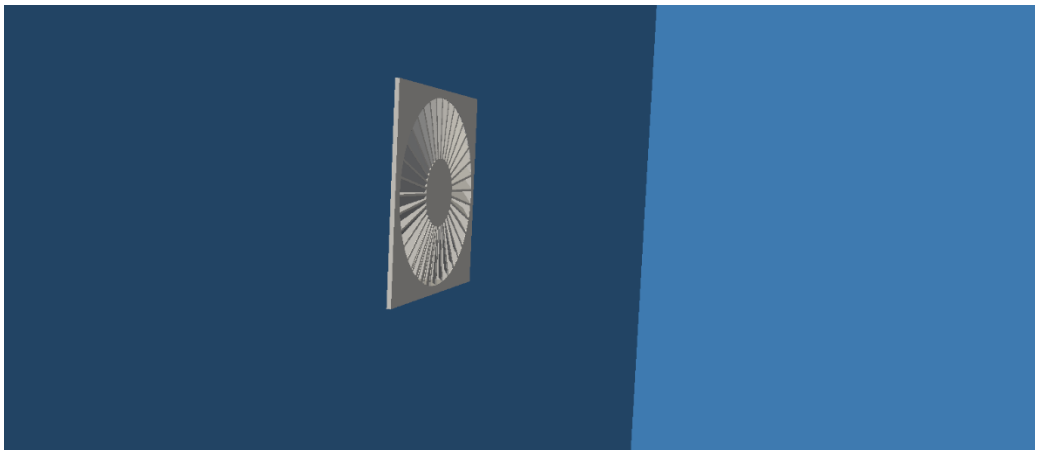
Potrebno je napomenuti da prva inačica vrtložnog radijalnog difuzora ima konstantan kut lopatica od 30° spram horizontalne ravnine i neznatno veći unutarnji promjer lopatica (slika 12), dok je druga inačica, izrađena točno prema radioničkom nacrtu te se kut lopatica mijenja linearno od 15° na unutarnjem radijusu do 22° na vanjskom. Ove potonja, točna inačica razlikuje se i po prisustvu obuhvatnog prstena na vanjskom radijusu lopatica (slike 13 i 14), Ova posljednje navedena razlika u geometriji ne utječe značajno na uspostavljene profile brzina unutar prostorije.



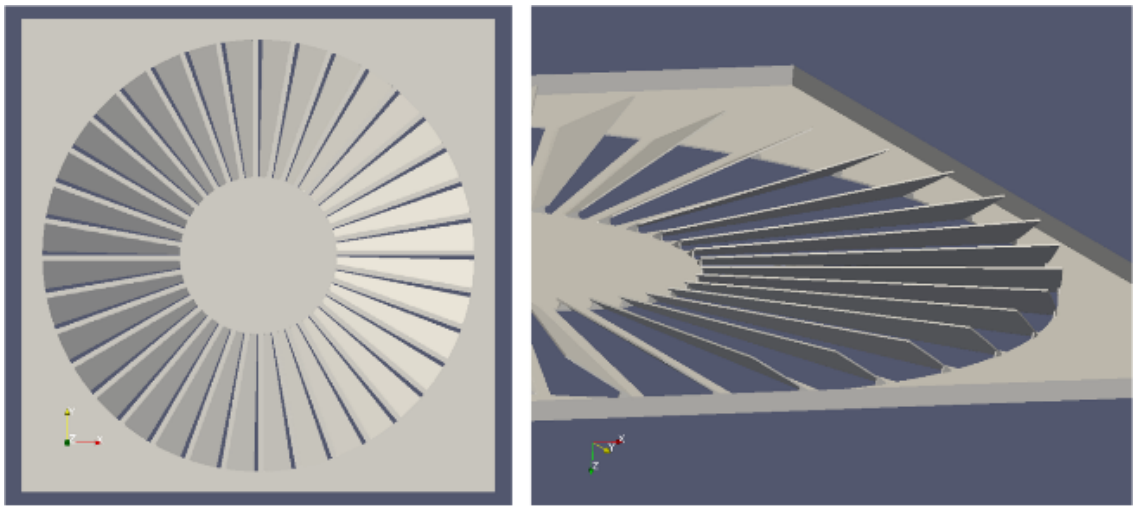
Slika 9. Model prostorije s centralno smještenim difuzorom



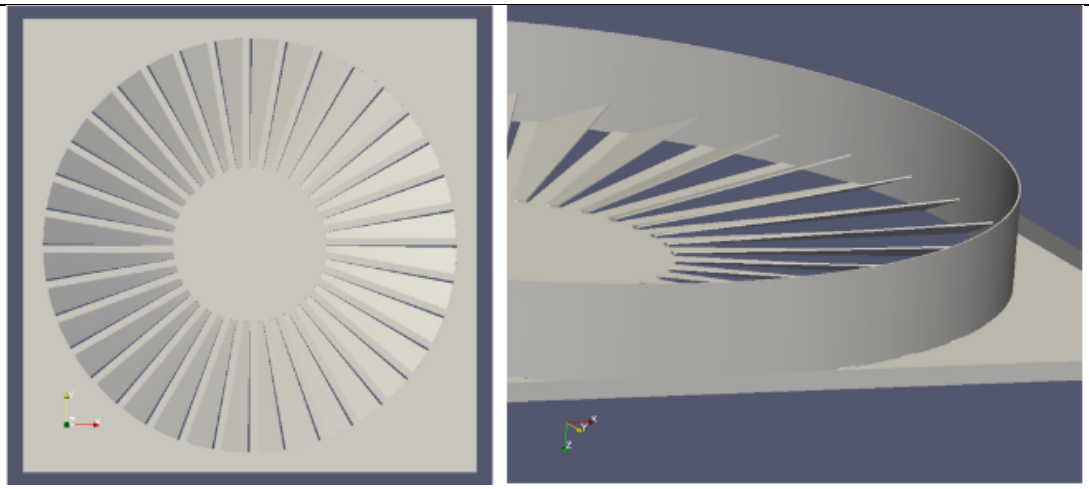
Slika 10. Difuzor s vrtložnim anemostatom



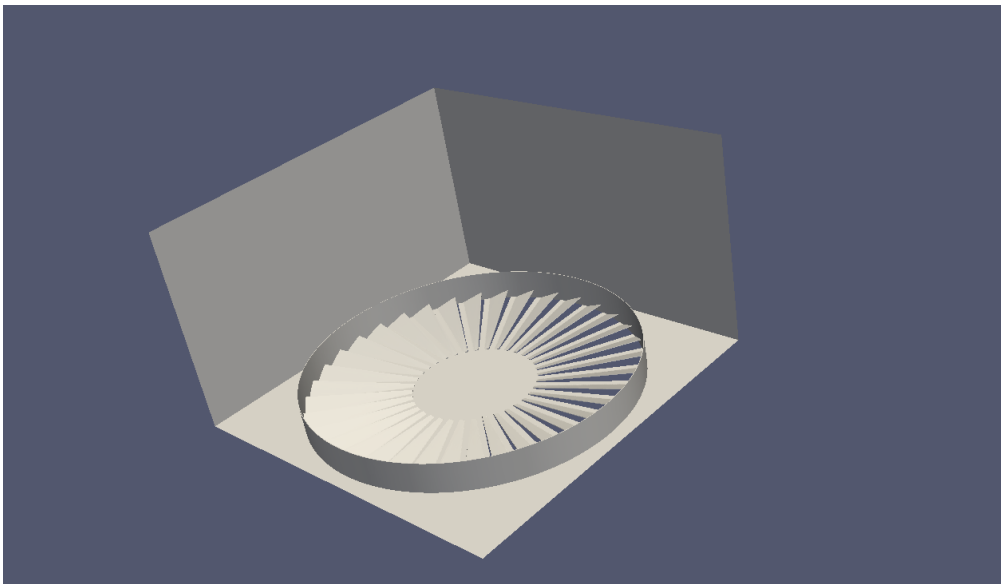
Slika 11. Smještaj difuzora u prostoru



Slika 12. Istrujna ploča, 1. verzija



Slika 13. Istrujna ploča, 2. verzija

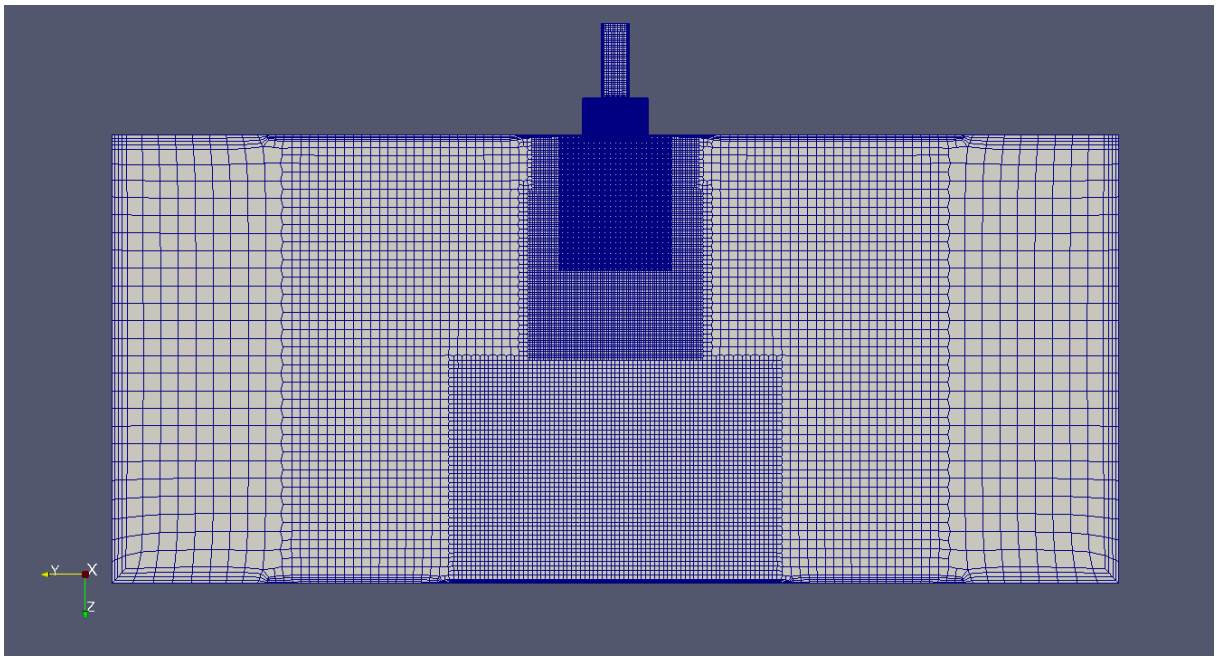


Slika 14. Lopatice okružene prstenom, 2. verzija

4.2. Prostorna diskretizacija područja proračuna

Modeli napravljeni u programskom paketu *Salome_Meca V2016* su eksportirani u .STEP formatu. Prije korištenja programa cfMesh [10] potrebno je rubne površine izdvojiti i spremiti u .STL formatu te ih opet spojiti i spremiti u .fms formatu. Trenutna geometrija u .fms formatu

se sada podvrgava programu cfMesh koji kreira mrežu konačnih volumena. Izrađena mreža je naknadno profinjena u područjima zidova prostorije kako bi se formirala finija diskretizacija u područjima graničnog sloja.

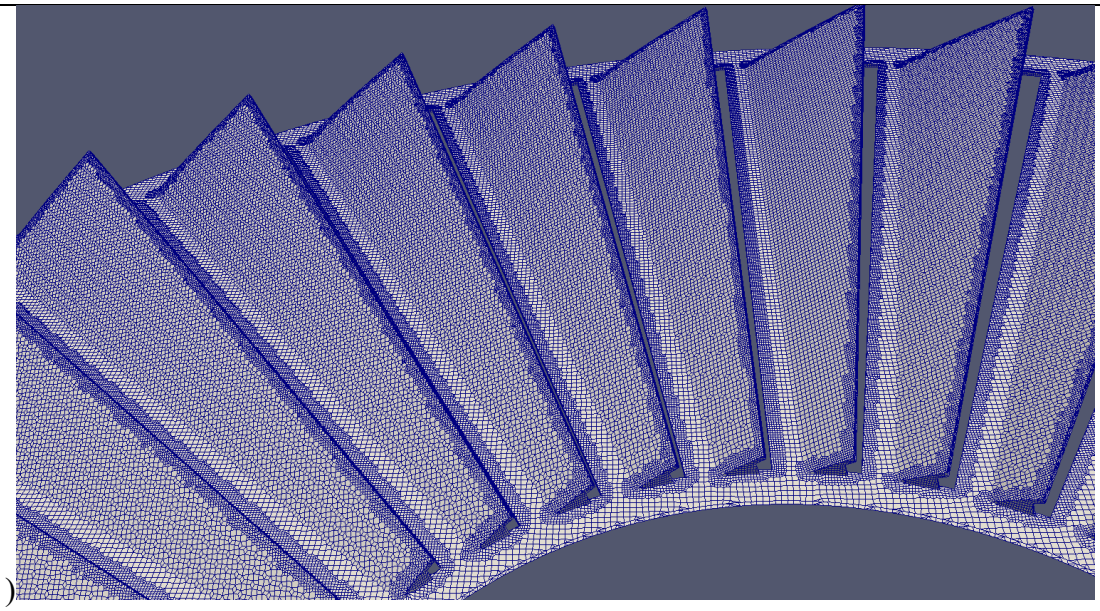


Slika 15. Diskretizacija prostora za 1. verziju difuzora

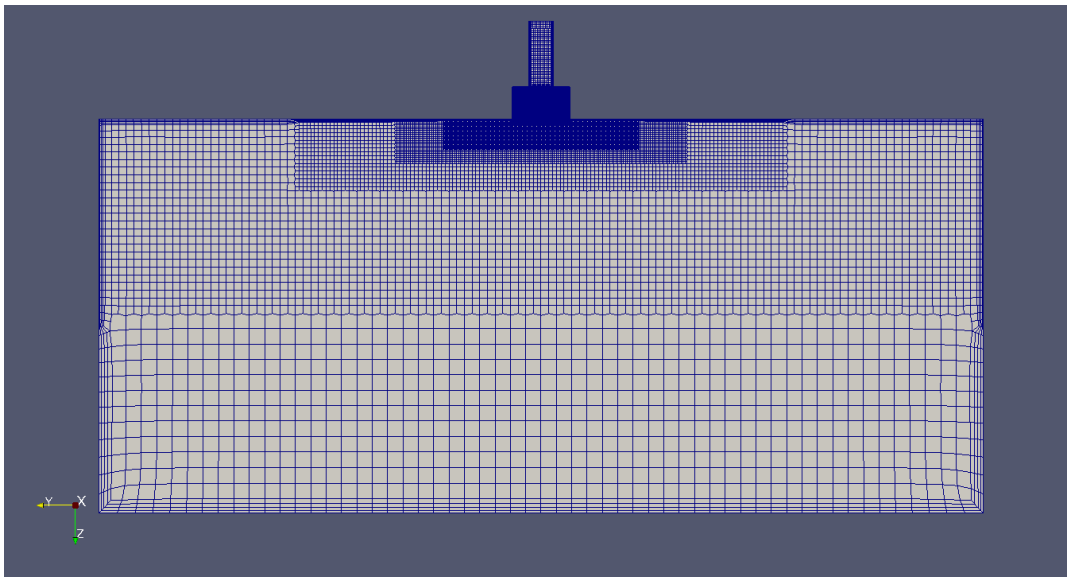
U cilju izvedbe ovog rada u zadanom obimu i unutar dostupnih računalnih resursa, korištene su mreže koje su tipično imale 6.5 milijuna konačnih volumena

Stoga se pri proračunima pojedinih varijanti, pristupilo ciljanom profinjavanju prostorne diskretizacije, ovisno o prirodi pojave koja je bila predmet istraživanja (slike 15 i 17). Tako je primjerice za jedan od proračuna 1. varijante geometrije mreža finija ispod difuzora jer je očekivano strujanje u početnim trenutcima prema podu (slika 15). U slučaju istog reda diskretizacije kao rubni prostori postoji mogućnost krivih rezultata simulacije zbog velikih gradijenata brzine u smjeru poda u početnim iteracijama. U slučaju ove varijante prostor je diskretiziran na 6565187 konačnih volumena.

Također, zbog specifičnosti geometrije difuzora u svim varijantama je bilo nužno posebno profiniti diskretizaciju u području oštrih rubova i uskih prolaza (slike 16 i 18)

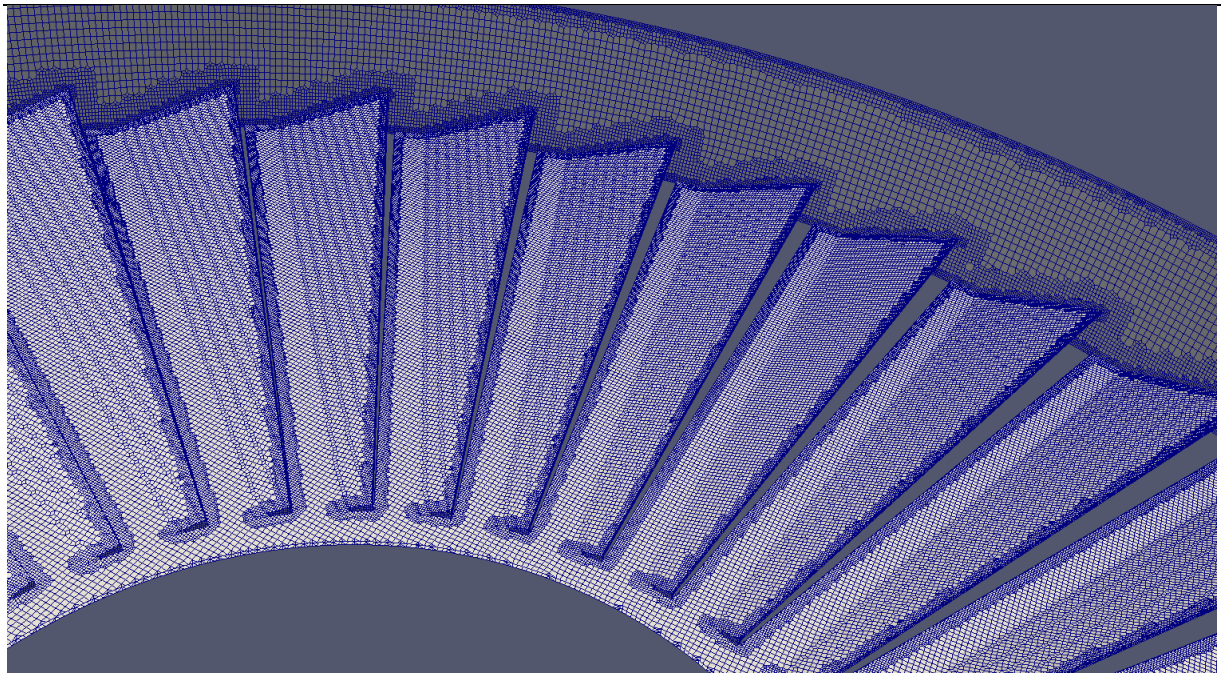


Slika 16. Diskretizacija lopatica za 1. verziju



Slika 17. Diskretizacija prostora za 2. verziju

Za izvedbu difuzora s unutarnjim prstenom očekivan smjer strujanja je radijalan od prvog trenutka. Toj pretpostavci je prilagođena mreža kako je prikazano na Slici 16. Mreža je također profinjena obzirom da su mjerenja [2] s kojima se uspoređuje simulacija izvršena u tom prostoru. Prostor za drugu verziju lopatica je diskretiziran na 6729863 konačnih volumena.



Slika 18. Lopatice okružene unutarnjim prstenom

4.3. Zadavanje rubnih uvjeta

Za izvođenje svake numeričke simulacije potrebni su rubni uvjeti, odnosno poznate fizikalne veličine. Kao rubni uvjet se koriste rezultati nekih drugih istraživanja, pretpostavljene iskustvene vrijednosti te vrijednosti fizikalnih veličina koje znamo prije same numeričke simulacije. Prilikom izrade numeričke simulacije potrebna vrijednost fizikalne veličine je brzina strujanja zraka koji ulazi u vrtložni radijalni difuzor. Analiza same numeričke simulacije temelji se na usporedbi dobivenih rezultata sa rezultatima mjerenja [2] koji su prikazani u bezdimenzijskom obliku. Usporedba rezultata se obzirom na bezdimenzijski prikaz brzina svodi na uspoređivanje profila brzine po visini prostorije, te ukoliko se brzine kreću tako da se vrijednosti Reynoldsova broja ne mijenjaju značajno, sam iznos brzine irelevantan. Iz navedenog razloga je za rubni uvjet brzine strujanja na ulazu u vrtložni radijalni difuzor ovisno o varijanti proračuna uzet pogodan uvjet brzine. Ovo je omogućilo da se na istoj mreži konačnih volumena ispita ponašanje različitih modela turbulencije i različitih pristupa modeliranju zidne turbulencije.

U programskom paketu *OpenFOAM* potrebno je odabrati odgovarajući rubni uvjet svake plohe. Rubni uvjeti su odabrani u skladu ponašanja fluida u stvarnosti. Postavljeni rubni uvjeti osiguravaju nepropusnost stjenki zidova, brzinu strujanja fluida u kanalu prije difuzora, uniformno strujanje bez gradijenta na izlazu iz prostorije. Strujanje unutar prostora je turbulentno te je potrebno koristiti prikladne rubne uvjete za zidove. Profinjena mreža uz vanjske zidove omogućuje bolji opis graničnog sloja i primjenu tzv. *Low-Re* pristupa pri modeliranju turbulencije uz zid u slučaju pojedinih varijanti proračuna.

Pravilo odabrani rubni uvjeti su nužni za uspješnost proračuna kako bi se dobili rezultati koji se mogu izmjeriti u stvarnosti, inače simulacija ne zadovoljava traženu točnost i ne može se iskoristiti za nikakva istraživanja ili poboljšavanja zadanog problema.

Naziv površine	Vrsta granice	Rubni uvjet		
		U	p	k
Izlaz_xp	patch	freestream	freestreamPressure	zeroGradient
Izlaz_xm	symmetry	symmetry	symmetry	symmetry
Izlaz_yp	symmetry	symmetry	symmetry	symmetry
Izlaz_ym	symmetry	symmetry	symmetry	symmetry
Kanal_izlaz_xp	symmetry	symmetry	symmetry	symmetry
Kanal_izlaz_xm	symmetry	symmetry	symmetry	symmetry
Kanal_izlaz_yp	symmetry	symmetry	symmetry	symmetry
Kanal_izlaz_ym	symmetry	symmetry	symmetry	symmetry
Ulaz	patch	freestream	freestreamPressure	fixedValue
Kanal_ulaz	symmetry	symmetry	symmetry	symmetry
Kutija_centar	wall	fixedValue	zeroGradient	kqRWallFunction
Kutija_obod	wall	fixedValue	zeroGradient	kqRWallFunction
Kutija_xp	wall	fixedValue	zeroGradient	kqRWallFunction
Kutija_xm	wall	fixedValue	zeroGradient	kqRWallFunction
Kutija_yp	wall	fixedValue	zeroGradient	kqRWallFunction
Kutija_ym	wall	fixedValue	zeroGradient	kqRWallFunction
Kutija_z	wall	fixedValue	zeroGradient	kqRWallFunction
Lopatice	wall	fixedValue	zeroGradient	kqRWallFunction
Maska_centar	wall	fixedValue	zeroGradient	kqRWallFunction
Maska_bočne_stranice	wall	fixedValue	zeroGradient	kqRWallFunction
Maska_obod	wall	fixedValue	zeroGradient	kqRWallFunction
Pod	wall	fixedValue	zeroGradient	kqRWallFunction
Strop	wall	fixedValue	zeroGradient	kqRWallFunction

Tablica 2: Tipični rubni uvjeti (U, p, k)

Naziv granice	Vrsta granice	Rubni uvjet		
		U	p	k
Zid_xp	wall	fixedValue	zeroGradient	kqRWallFunction
Zid_xm	wall	fixedValue	zeroGradient	kqRWallFunction
Zid_yp	wall	fixedValue	zeroGradient	kqRWallFunction
Zid_ym	wall	fixedValue	zeroGradient	kqRWallFunction
Kutija_prsten_brid	wall	fixedValue	zeroGradient	kqRWallFunction
Kutija_prsten_unutra	wall	fixedValue	zeroGradient	kqRWallFunction
Kutija_prsten_vani	wall	fixedValue	zeroGradient	kqRWallFunction

Tablica 3: Nastavak tablice 2.

Naziv granice	Vrsta granice	Rubni uvjet	
		ω	ν_t
Izlaz_xp	patch	zeroGradient	calculated
Izlaz_xm	symmetry	symmetry	symmetry
Izlaz_yp	symmetry	symmetry	symmetry
Izlaz_ym	symmetry	symmetry	symmetry
Kanal_izlaz_xp	symmetry	symmetry	symmetry
Kanal_izlaz_xm	symmetry	symmetry	symmetry
Kanal_izlaz_yp	symmetry	symmetry	symmetry
Kanal_izlaz_ym	symmetry	symmetry	symmetry
Ulaz	patch	fixedValue	calculated
Kanal_ulaz	symmetry	symmetry	symmetry
Kutija_centar	wall	omegaWallFunction	nutkWallFunction

Tablica 4: Tipični rubni uvjeti (ω, ν_t)

Naziv granice	Vrsta granice	Rubni uvjet	
		ω	ν_t
Kutija_obod	wall	omegaWallFunction	nutkWallFunction
Kutija_xp	wall	omegaWallFunction	nutkWallFunction
Kutija_xm	wall	omegaWallFunction	nutkWallFunction
Kutija_yp	wall	omegaWallFunction	nutkWallFunction
Kutija_ym	wall	omegaWallFunction	nutkWallFunction
Kutija_z	wall	omegaWallFunction	nutkWallFunction
Lopatice	wall	omegaWallFunction	nutkWallFunction
Maska_centar	wall	omegaWallFunction	nutkWallFunction
Maska_bočne_stranice	wall	omegaWallFunction	nutkWallFunction
Maska_obod	wall	omegaWallFunction	nutkWallFunction
Pod	wall	omegaWallFunction	nutkWallFunction
Strop	wall	omegaWallFunction	nutkWallFunction
Zid_xp	wall	omegaWallFunction	nutkWallFunction
Zid_xm	wall	omegaWallFunction	nutkWallFunction
Zid_yp	wall	omegaWallFunction	nutkWallFunction
Zid_ym	wall	omegaWallFunction	nutkWallFunction
Kutija_prsten_brid	wall	omegaWallFunction	nutkWallFunction
Kutija_prsten_unutra	wall	omegaWallFunction	nutkWallFunction
Kutija_prsten_vani	wall	omegaWallFunction	nutkWallFunction

Tablica 5: Nastavak tablice 4.

Prikazani rubni uvjeti u prijašnjim tablicama su tipični za sve varijante proračuna. Za prvu verziju geometrijskog modela rubni uvjeti su slični ovima u gornjoj tablici, razlika je što ne postoje sljedeće plohe: Kutija_prsten_brid, Kutija_prsten_unutra i Kutija_prsten_vani.

Navedenim tablicama su definirani svi potrebni rubni uvjeti.

4.4. Zadavanje veličina *k-ω* SST modela turbulencije

Zadnji korak prije samog numeričkog simuliranja je zadavanje potrebnih vrijednosti specifične kinetičke energije turbulencije i specifične brzine disipacije.

Prema izravnoj korespondenciji s autorom rada [2], na ulazu u područje proračuna (ulazni priključak difuzora putem cijevi s kružnim poprečnim presjekom) primjenjuje se perforirana ploča za ujednačavanje mlaza, koja ima površinu otvora približno jednaku polovici površine poprečnog presjeka ulaza, dok je procijenjeno da su otvori na toj ploči promjera 5 mm. Temeljem ovih pretpostavki, vrijednosti veličina modela turbulencije na ulazu su izvedene temeljem intenziteta turbulencije od 100% i duljine l=5 mm

Specifična kinetička energija turbulencija se računa kao:

$$k = \frac{3}{2}(U * I)^2 \tag{34}$$

gdje U predstavlja brzinu neporemećenog strujanja, I predstavlja intenzitet turbulencije. Ovakav tip strujanja spada pod iznimno turbulentna strujanja što se i očituje velikim padovima tlaka kroz vrtložni radijalni difuzor.

Specifična brzina disipacije se računa kao:

$$\omega = \frac{\sqrt{k}}{C_\mu^{0.25} * l} \tag{35}$$

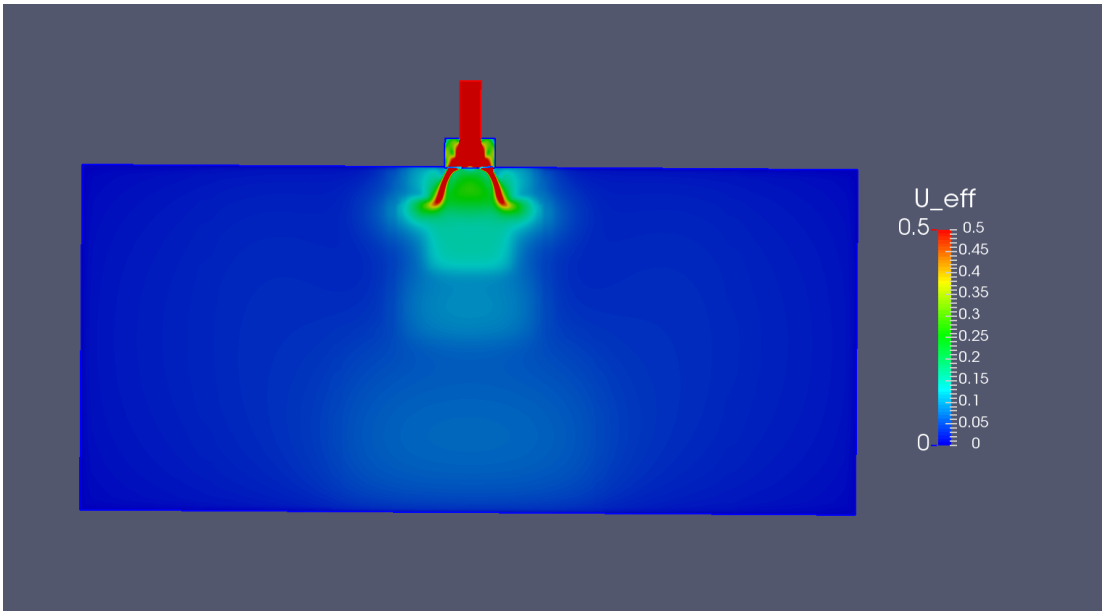
gdje k predstavlja prethodno izračunatu specifičnu kinetičku energiju turbulencija, C_μ predstavlja konstantu modela turbulencije koja iznosi 0.09, l predstavlja karakterističnu duljinu turbulencije. U sladu s navedenim, l=0,005 m u svim varijantama proračuna. [9]

4.5. Numeričke sheme

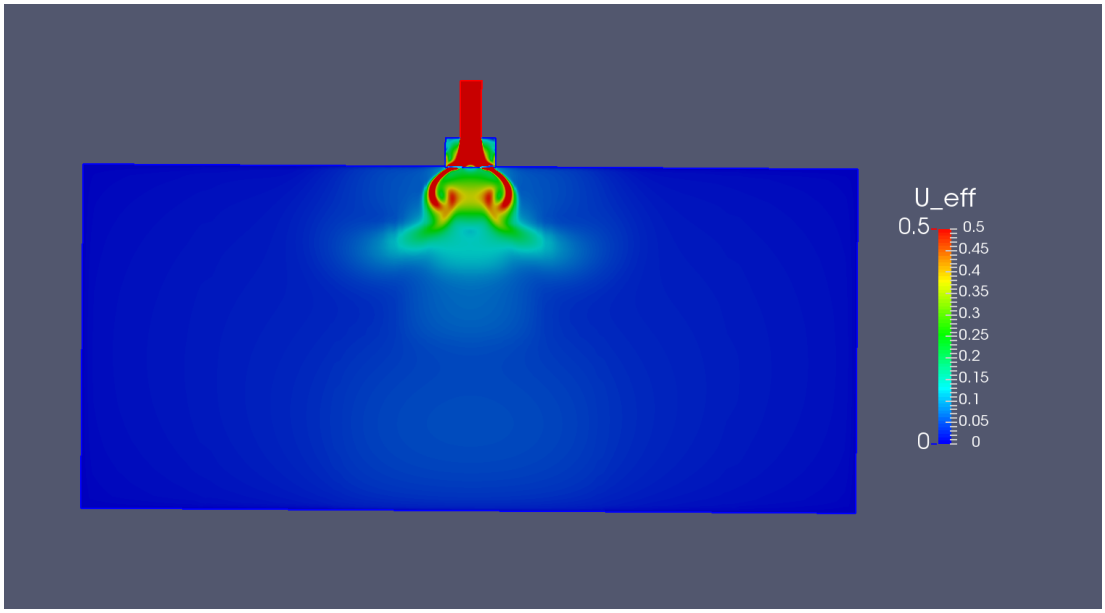
Korištena numerička shema za divergense brzine je *linearUpwindV* dok je za divergens specifične kinetičke turbulencije i specifične brzine disipacije korištena numerička shema *Gauss upwind.* Numerička shema korištena za divergens brzine je drugog reda točnosti. Proračun je započet sa numeričkom shemom prvog reda točnosti, ali je promijenjeno na drugi red točnosti kada je uočeno da će proračun konvergirati. Numerička shema korištena za divergens kinetičke energije turbulencije i divergens specifične brzine disipacije je prvog reda točnosti. S tom numeričkom shemom je započet proračun i nije naknadno mijenjan. [5]

5. REZULTATI PRORAČUNA

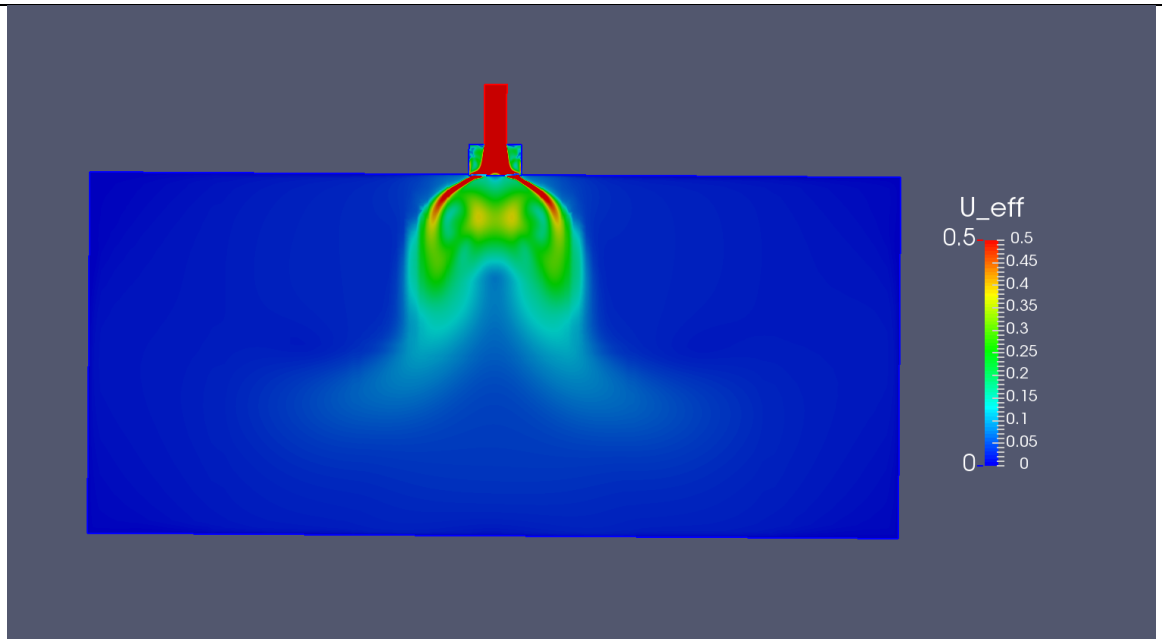
U nastavku su prikazani rezultati proračuna za dvije izvedbe vrtložnog radijalnog difuzora kako je već spomenuto. Rezultati numeričke simulacije pokazuju da postoje razlike u načinu strujanja, ali kada kondicionirani zrak struji određen vremenski period kroz difuzor profili strujanja se ujednačuju i razlike kao i da nema. Proračun je proveden sustav sa konstantnim volumskim protokom zraka (*eng. CAV-constant air volume).* Slike 18. do 22. su rezultati numeričke simulacije za prvu geometrijsku izvedbu difuzora.



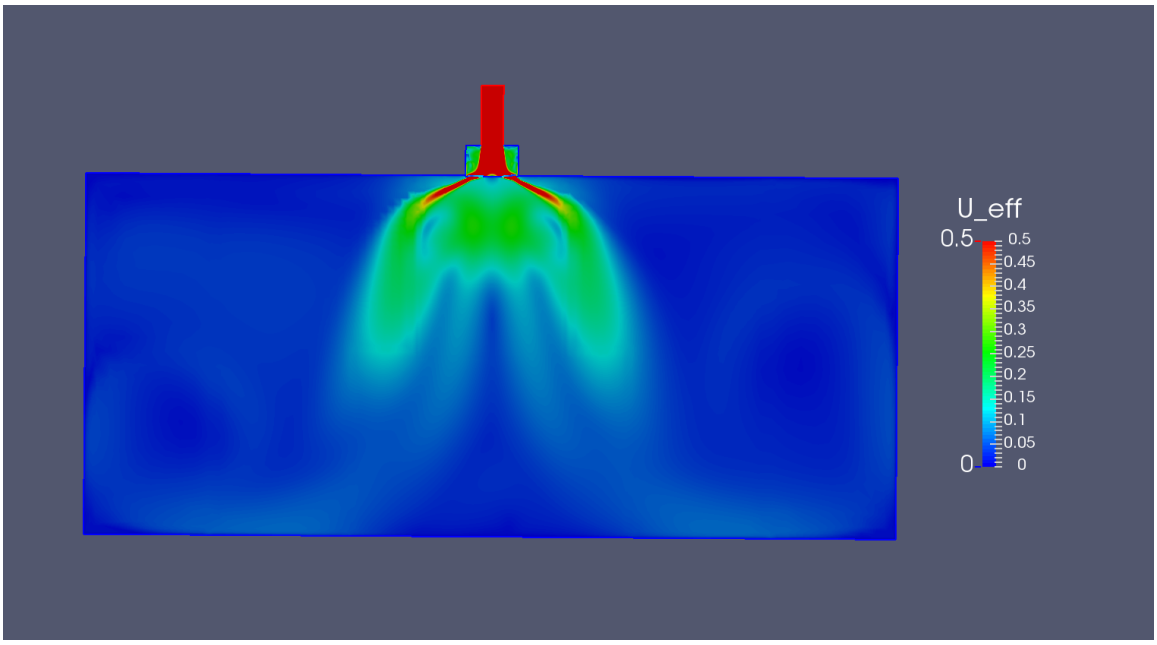
Slika 19. Prikaz brzina po presjeku prostorije (300. iteracija)



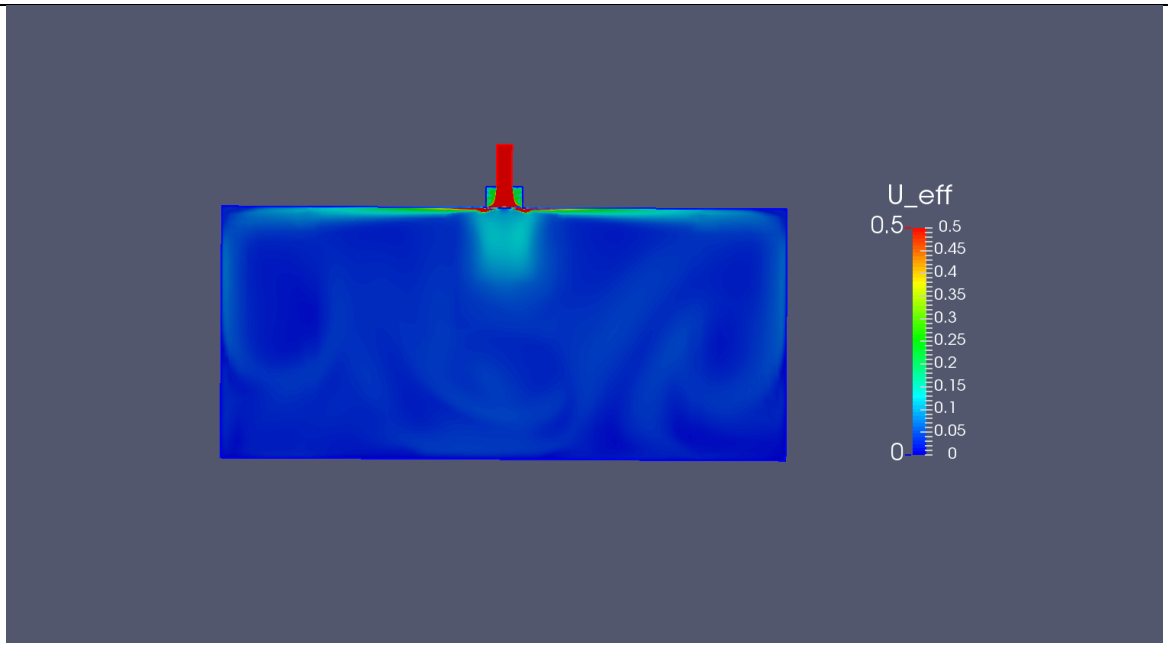
Slika 20. Prikaz polja brzina po presjeku prostorije (400. iteracija)



Slika 21. Prikaz polja brzina po presjeku prostorije (1000. iteracija)



Slika 22. Prikaz polja brzina po presjeku prostorije (1500. iteracija)



Slika 23. Prikaz polja brzina po presjeku prostorije (2400. iteracija)

Nakon 2400. iteracije brzine po prostoriji su postale stacionarne. Na slikama se vidi smjer strujanja zraka u početnim trenutcima koji nastoji strujati prema podu prostorije. Svakom sljedećom iteracijom mlaz struje zraka dobiva izraženije radijalnu komponentu strujanja prema zidovima prostorije. U stacionarnom stanju gotovo sav dobavni zrak iz difuzora struji prema zidovima. Potrebno je naglasiti da je prostorija simetrična po x i y osi te je gotovo identična slika strujanja ako se gleda ravnina (gornji presjeci su u x-z ravnini, a ishodište u središtu lopatica). Sa slike 23. vidljivo je da se početne iteracije poklapaju sa dobivenom slikom u eksperimentu.



Slika 24. Eksperimentalno mjerenje, difuzor bez prstena [2]

U izravnoj korespondenciji s autorom rada [2] došlo se do saznanja da se u slučaju primjene difuzora s istrujnom pločom bez prstena koji obavija lopatice, događa neželjeno istrujavanje u vertikalnom smjeru umjesto u radijalnom, te da se ovo strujanje naknadno mijenja i postaje željenog, radijalnog oblika.

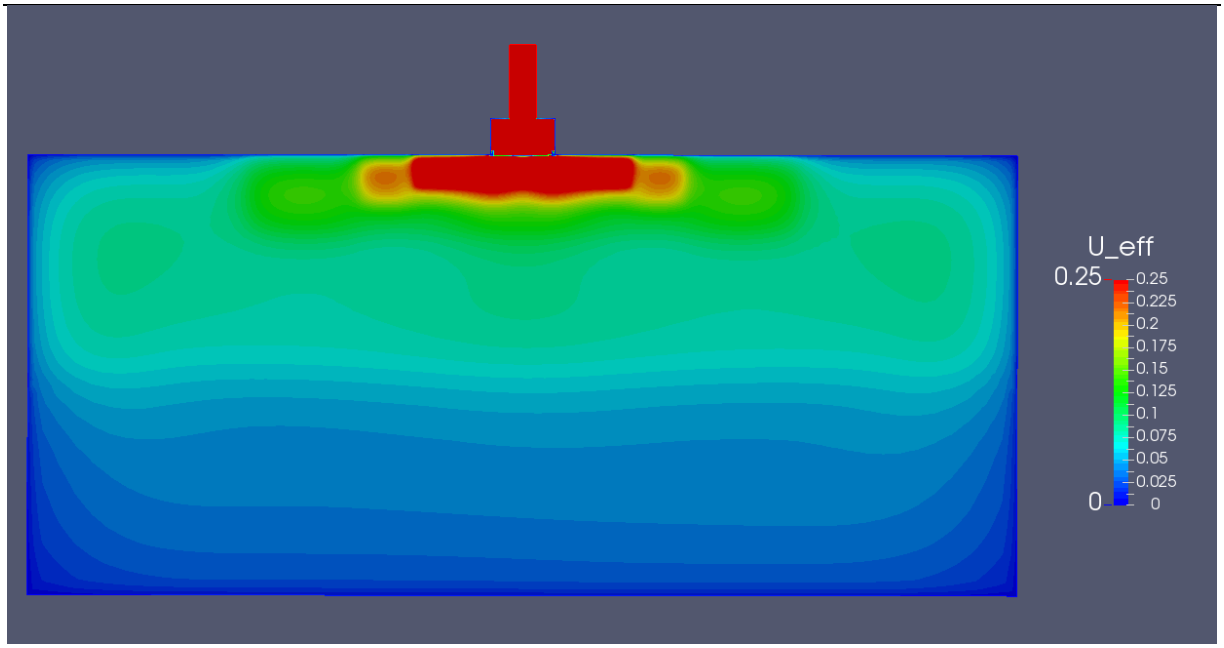
Rezultati proračuna 1. inačice geometrije difuzora su upravo ovakvo ponašanje i predvidjeli.

Predviđeni obim ovog rada ne dopušta primjenu proračuna nestacionarnog strujanja na ovako velikim mrežama, no poznata je pojava da stacionarni rješavači prilikom približavanja konačnom rješenju prolaze kroz faze u kojima rješenja u pojedinim iteracijama nalikuju onima koja bi se dobila primjenom nestacionarnog rješavača, jesno bez ikakve točnosti po vremenu.

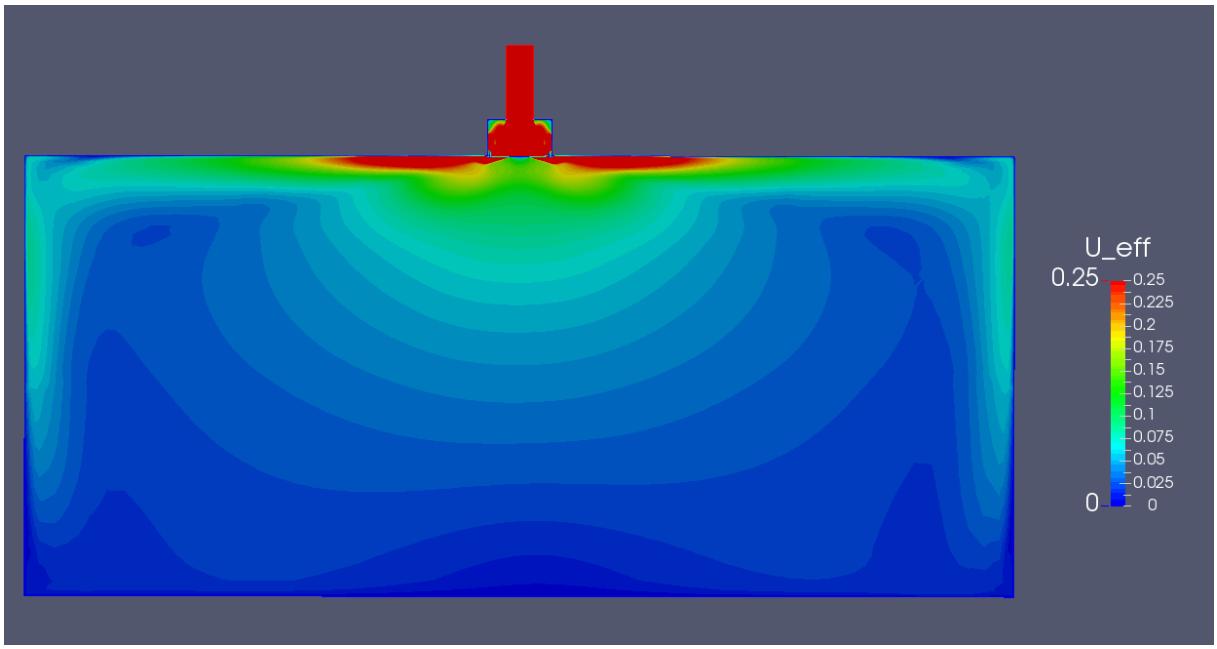
Znajući za ovu pojavu, sve varijante proračuna su započinjale od početne pretpostavke nulte vrijednosti brzine strujanja, te je ovakvo ponašanje odista uočeno samo u slučajevima difuzora bez prstena. Primjena nestacionarnih rješavača u budućim istraživanjima ove pojave zasigurno će gore navedeno i potvrditi i dati točniji oblik ove pojave spram vremena njena trajanja.

Kako bi ova pojava bila uspješno zabilježena i u simulacijama provedenim u ovome radu , u ovoj varijanti je primjenjen k-ω SST model turbulencije s modeliranjem turbulencije u graničnom sloju putem Low-Re pristupa (visina prvog sloja volumena uz zidove na kritičnim mjestima bila je takva da je njihovo težište smješteno u području $y^+<6$, slike 31 i 32)

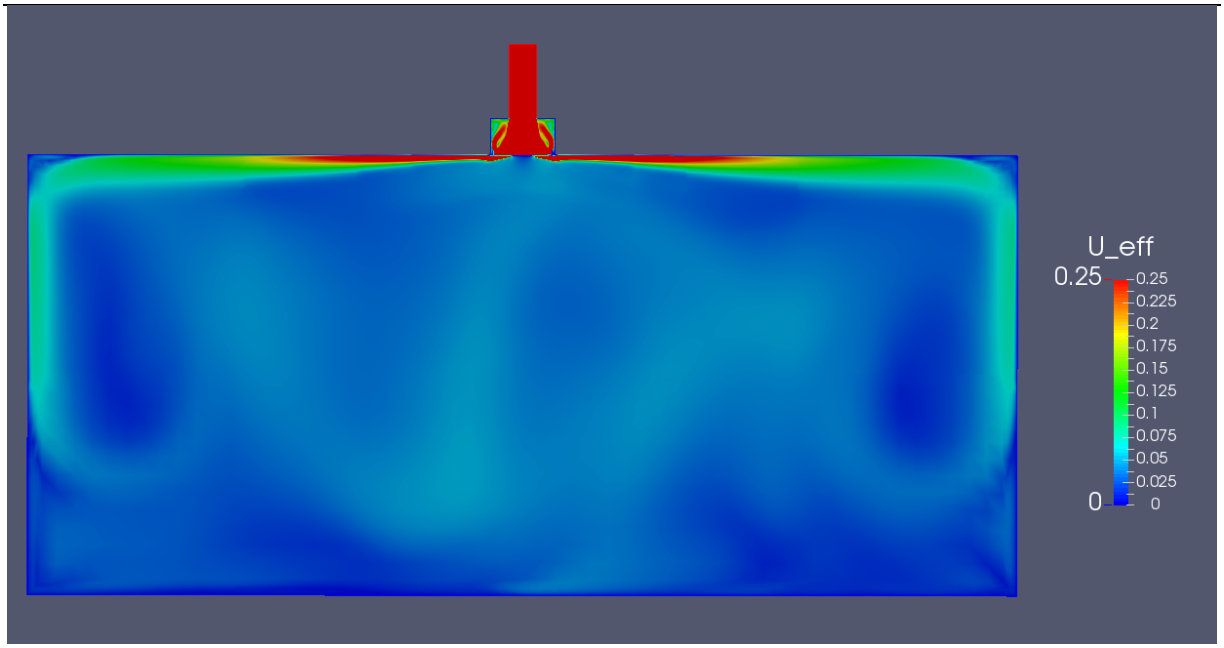
Slike 25. do 27. prikazuju polje brzina za drugu verziju geometrije difuzora, odnosno sa unutrašnjim prstenom oko lopatica.



Slika 25. Prikaz polja brzina po presjeku prostorije (50. iteracija)



Slika 26. Prikaz polja brzina po presjeku prostorije (400. iteracija)



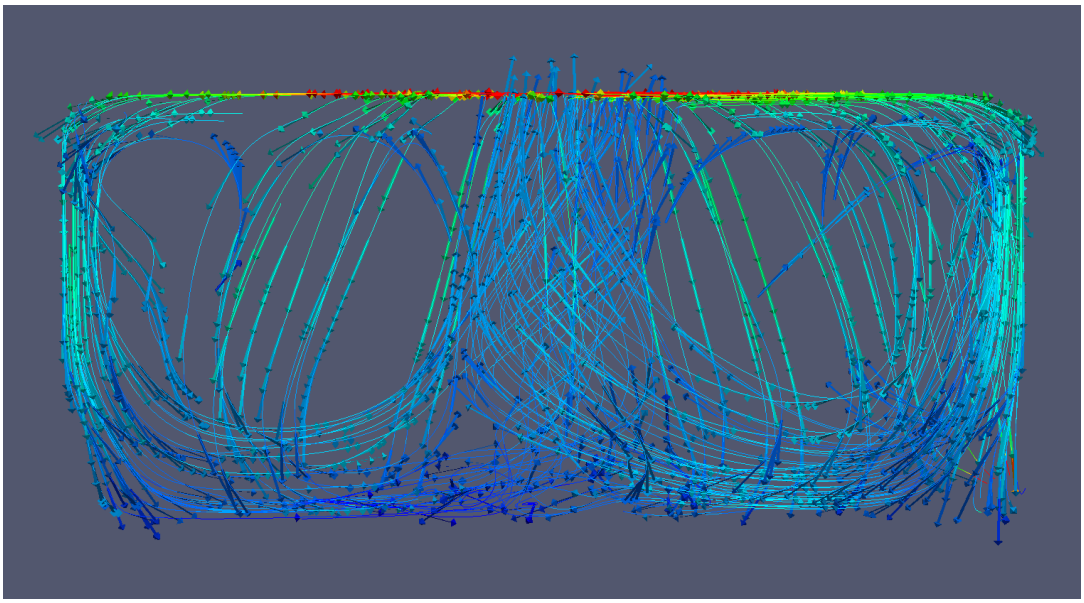
Slika 27. Prikaz polja brzina po presjeku prostorije (2000. iteracija)

U 2000. iteraciji polje brzina postaje stacionarno. Vidljiva je razlika u odnosu na prvu verziju geometrije gdje strujanje zraka u prvim iteracijama kreću prema podu, a kod verzije s prstenom strujanje zraka kreće radijalno prema zidovima i tako nastavlja do stacionarnog stanja. Sljedeće slike su prikazane za model s prstenom oko lopatica. Analizom polja brzina u stacionarnosti zaključuje se da su podjednaka i daljnje slike bi bile vrlo slične za obje verzije difuzora.

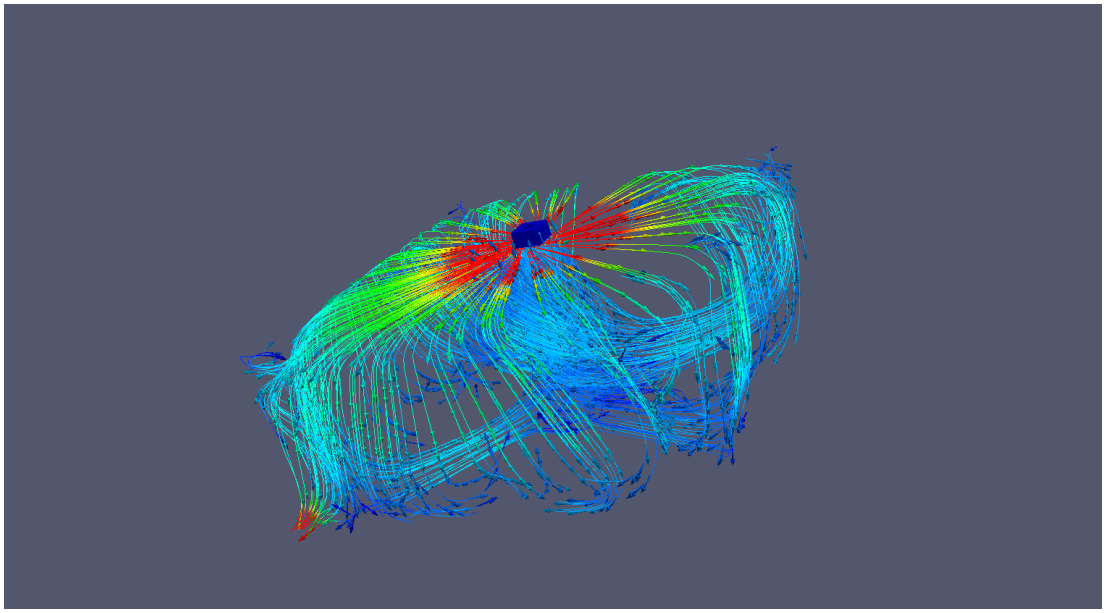
Slika 28. pokazuje da se simulacijom dobivena raspodjela zraka poklapa sa eksperimentom.



Slika 28. Eksperimentalno mjerenje, difuzor sa prstenom [2]

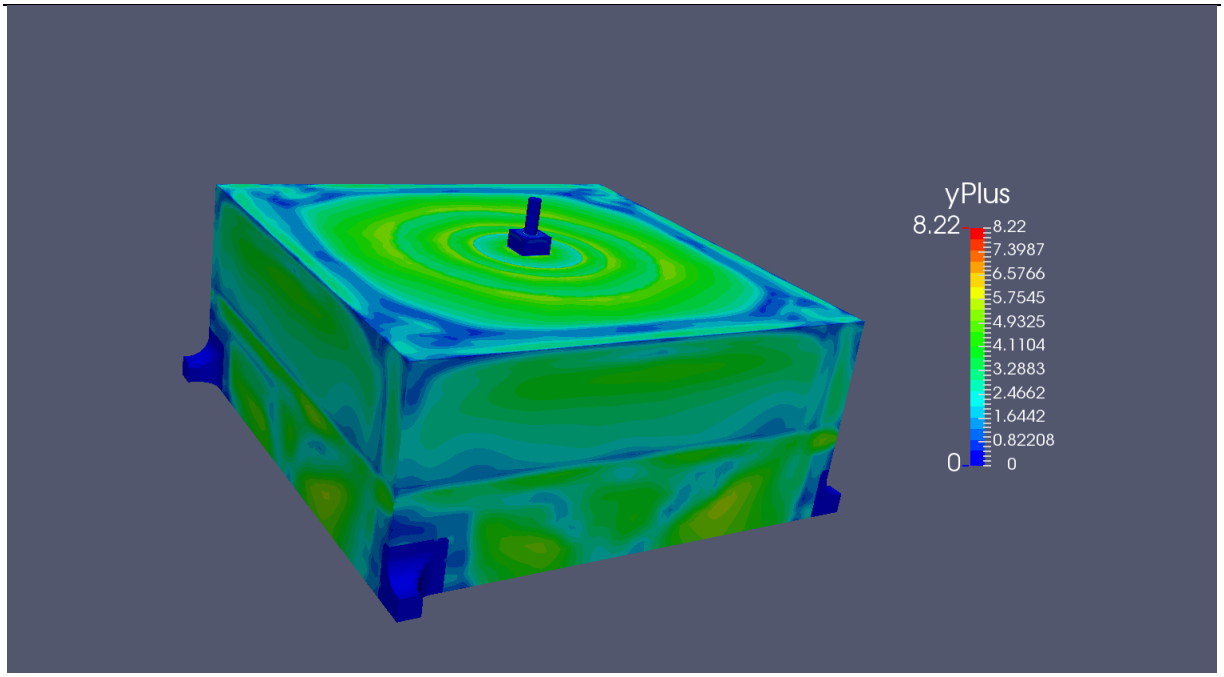


Slika 29. Strujnice u prostoriji (2D)

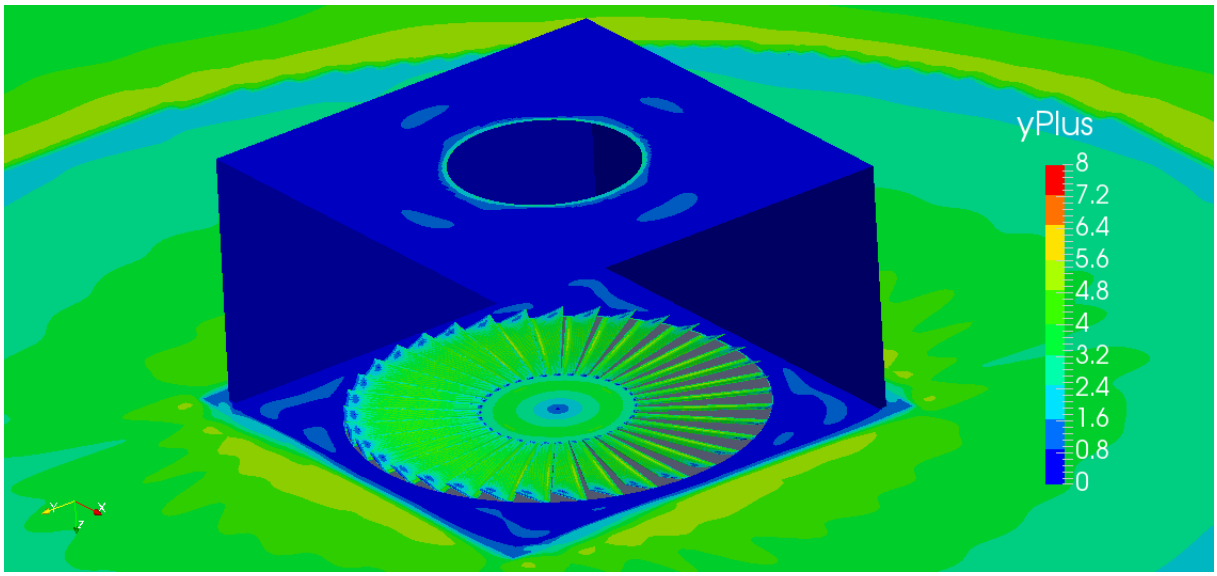


Slika 30. Strujnice u prostoriji (3D)

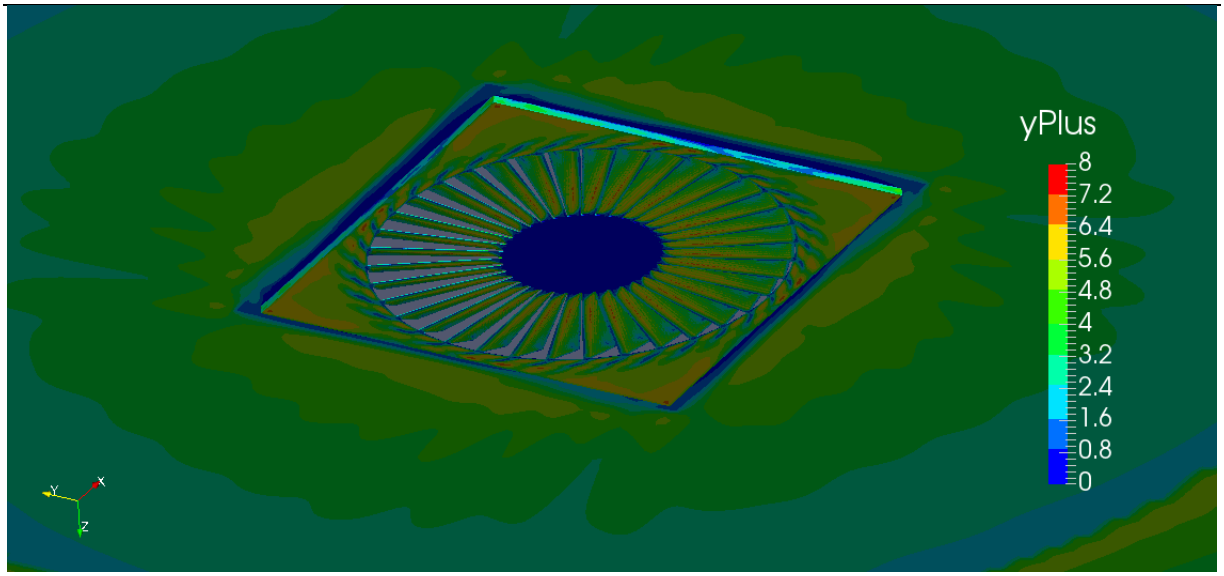
Na slikama 27. i 28. vidi se smjer dobavnog zraka iz difuzora. Zrak se prvo kreće radijalno prema zidovima i polako se spušta prema zoni boravka. Takav zrak se u kontekstu kvalitete zraka unutar stambenih i poslovnih prostora smatra iskorištenim zrakom odnosno više nije zadovoljavajuće kvalitete zraka (sadržaj kisika, temperatura). Istrošeni zrak koji nije odsisan kroz odsisne rešetke smještene uz pod prostorije dolazi ponovno do difuzora te se kvaliteta istrošenog zraka poboljšava njegovim miješanjem sa kondicioniranim "svježim" zrakom.



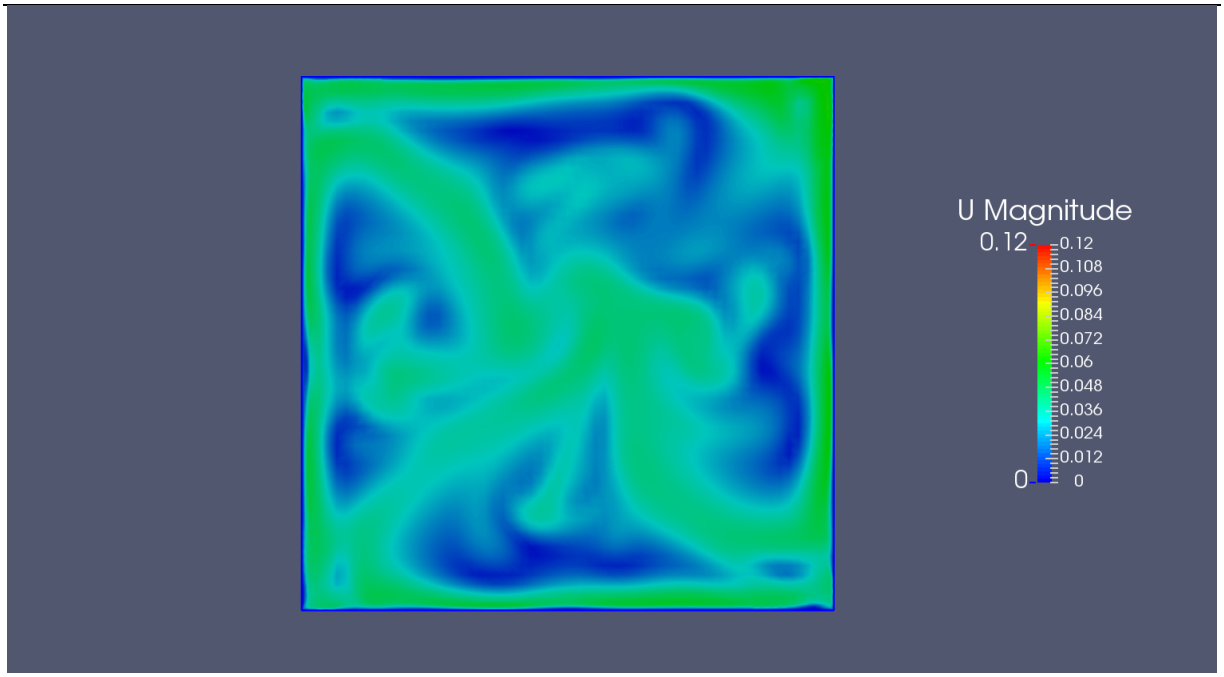
Slika 31. Prikaz y+ globalno



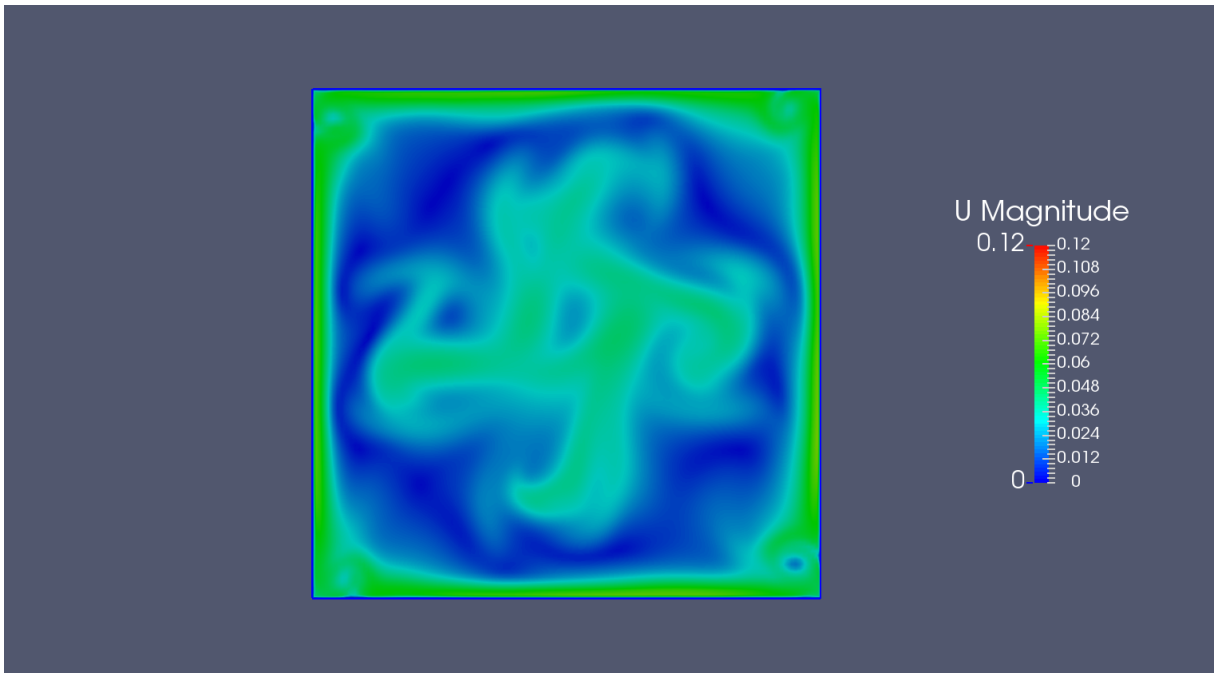
Slika 32. Prikaz veličine y^+ u kritičnim područjima



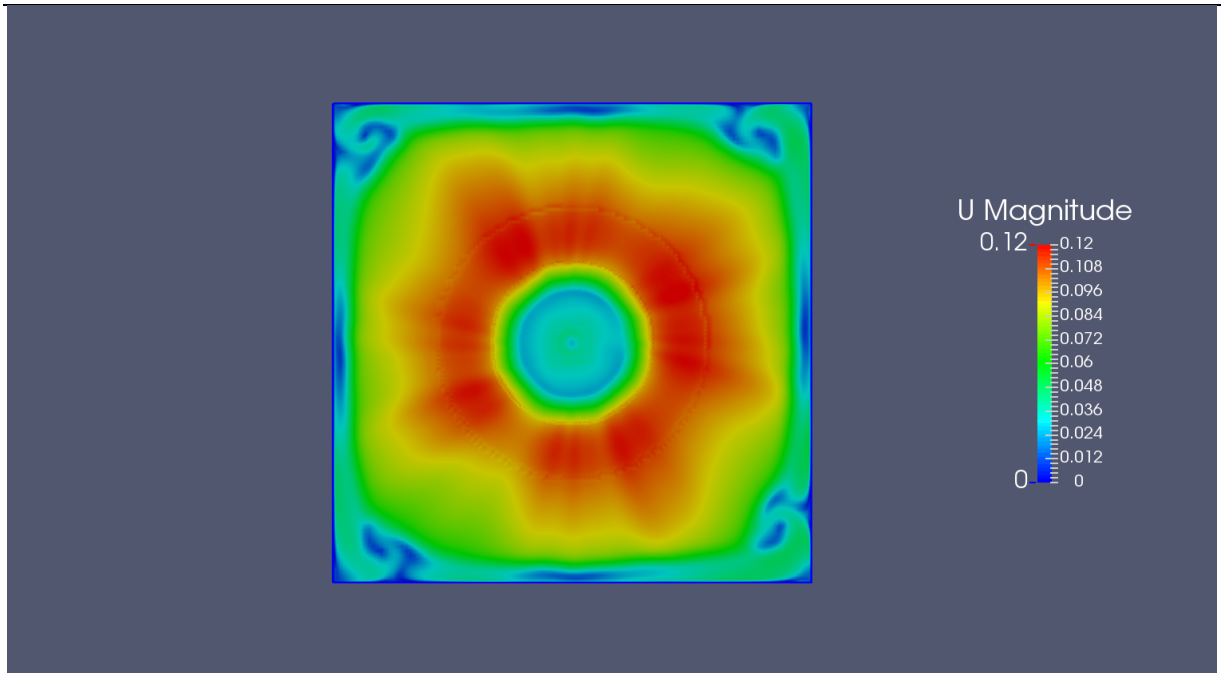
Slika 33. Prikaz veličine y+ u kritičnim područjima



Slika 34. Prikaz polja brzine na visini 1.5m od poda (xy-ravnina)



Slika 35. Prikaz polja brzine na visini 2.5m od poda (xy-ravnina)



Slika 36. Prikaz polja brzine na visini 3.9m od poda (xy-ravnina)

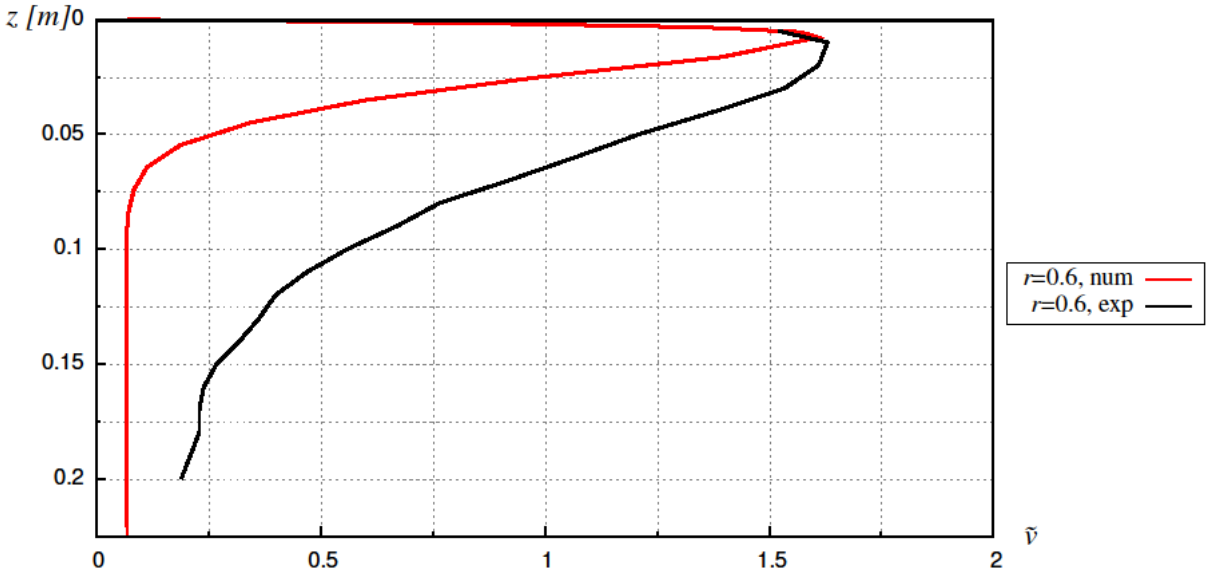
Slijed slika 37-40 prikazuje usporedbu rezultata provedenih simulacija s eksperimentom [2]. U radu [2] su profili brzina očitani s različitih radijalnih udaljenosti od osi difuzora, s rezolucijom po visini od 1 cm. Simulacija provedena za svrhu usporedbe s eksperimentom, provedena je s nešto većom rezolucijom mreže (8.98 mm) u tome području, ali s posebno profinjenim područjem uz strop (radi boljeg razlučivanja i primjene modeliranja zidne turbulencije u Low-Re režimu), kako je i vidljivo, po bogatijim krivuljama u području $0<z<0.01$ m

U eksperimentu [2] su rezultati dani za različite slučajeve u dimenzionalnom obliku, te je pokazano kako se svi slučajevi s istom geometrijom i različitim protocima zraka (zbog bliskih vrijednosti Reynoldsovih brojeva) ipak mogu svesti na isti bezdimenzijski prikaz.

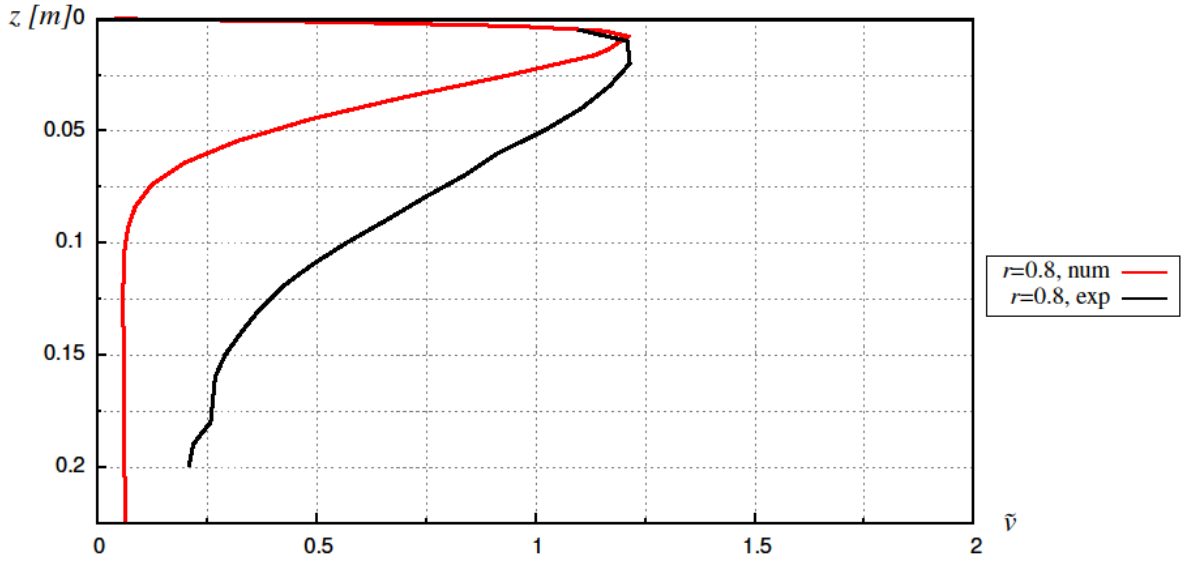
Stoga je za usporedbu odabran dimenzionalni prikaz za slučaj s Vef =3.5 m/s [2].

Pri prikazivanju profila dobivenih u ovome radu, uzet je profil brzine s radijusa 0.6 m, te je utvrđen potreban faktor kojim je brzine potrebno skalirati kako bi se najveća vrijednost na tome profilu poklopila s najvišom vrijednošću u pripadnom profilu dobivenom eksperimentom. Kasnije je taj faktor korišten pri usporedbama profila na svim ostalim radijusima.

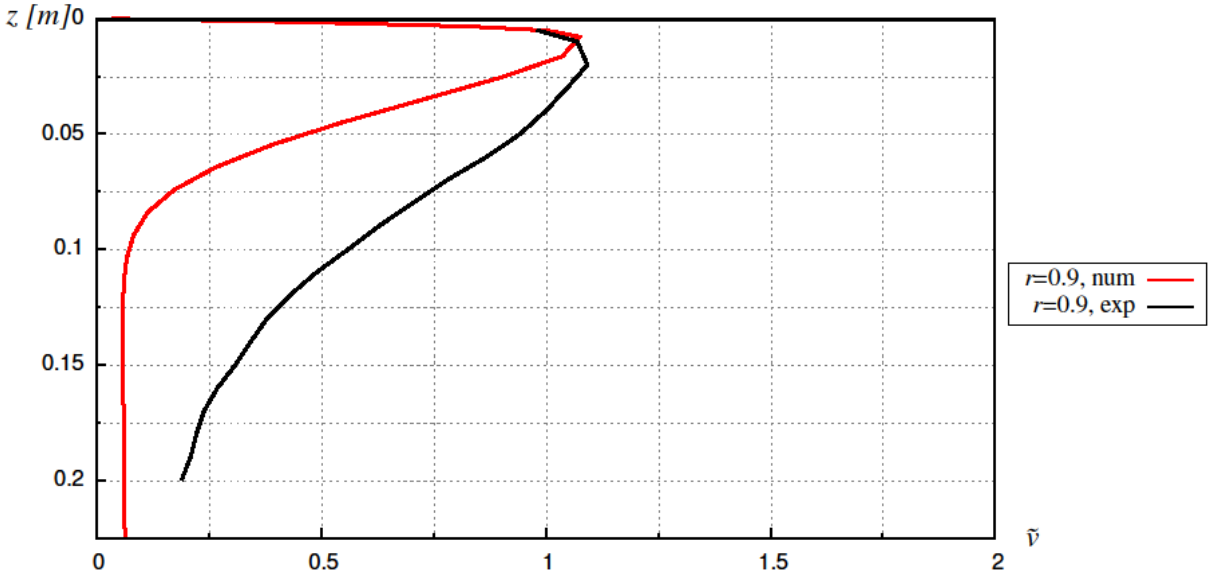
Prema rečenom, i iz prikaza na slikama 37-40, zaključuje se da profili dobiveni u simulaciji u potpunosti prate trend smanjivanja brzine po radijusu kakav je utvrđen i u eksperimentu, te se zaključuje da su u tome smislu računalne simulacije poput ove kakva su provedene u ovome radu primjenjive i korisne pri proučavanju pojava koje se javljaju u ventilaciji.



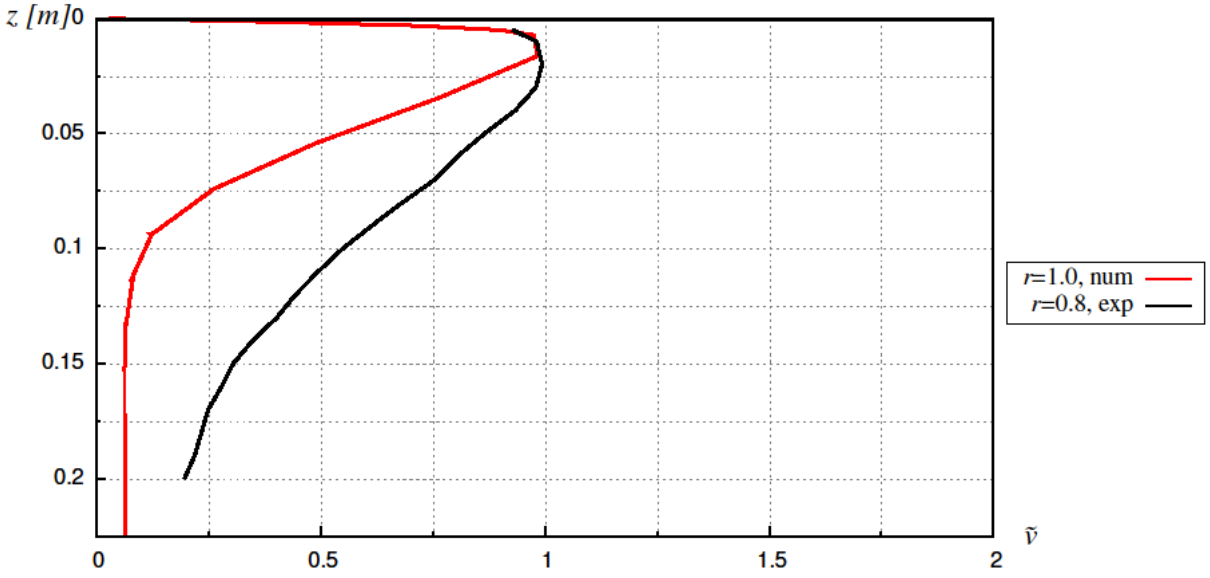
Slika 37. Usporedba rješenja r=60 cm [2]



Slika 38. Usporedba rješenja r=80 cm [2]



Slika 39. Usporedba rješenja r=90 cm [2]



Slika 40. Usporedba rješenja r=100 cm [2]

Uz navedeno poklapanje, primjećuje se i odstupanje u promjeni brzine duž osi z spram one utvrđene u eksperimentu.

Jedan od uzroka pripisuje se razlici u geometriji, gdje se iz usporedbe vertikalnih pozicija istrujne ploče (usporedba sl. 33. i slika 41.) može zaključiti da su zbog dodatno pomaknute

istrujne ploče spram ravnine stropa i pozicije maksimalnih brzina dobivenih u eksperimentu niže.



Slika 41. Odmak istrujne ploče [2]

Drugi razlog bi se mogao naći u istom doprinosu s prvim. Uz navedeno, u eksperimentu je uz perforiranu ploču za ujednačavanje mlaza na samom ulazu, dodatno korištena i mrežica za ujednačavanje strujanja u samoj kutiji difuzora, smještena po čitavom njenom presjeku, okomito na smjer toka.

Obje razlike dovele bi uz pomak maksimuma i do pojave više vrijednosti turbulencije u području mlaza što bi zbog veće turbulentne difuzije dovelo i do manje oštre promjene brzine duž osi z. Slučaj odmaknute ploče zbog toga što će tada zona separacije iza istrujne ploče biti veća, a mlaz na početku više odmaknut od stropa, a slučaj mrežice zbog stvaranje intenzivne turbulencije koja bi mogla doprinijeti i onoj na većim radijusima izvan kutije difuzora.

6. ZAKLJUČAK

U ovome radu su provedene računalne simulacije strujanja zraka pri prolasku kroz stropni ventilacijski difuzor s radijalnim mlazom. Pri izvedbi simulacija izrađeno je više varijanti geometrijskih modela i proračuna strujanja uz primjenu k-omega SST modela turbulencije, na mrežama od 6 milijuna konačnih volumena, te su rezultati uspoređeni s rezultatima eksperimenta.

Utvrđeno je da simulacije dobro predviđaju sliku strujanja, te dobro opisuju ponašanje mlaza u slučaju izostanka prstena s vanjske strane lopatica difuzora.

Pri simulacijama strujanja uz prisustvo prstena s vanjske strane lopatica, rezultati za profile brzine dobivene simulacijom su uspoređeni s rezultatima eksperimenta.

Utvrđeno je dobro podudaranje u radijalnoj raspodjeli brzine, dok se odstupanje po visini pripisuje razlici u geometriji pri samom stropu spram one koja je bila prisutna u eksperimentima, te u izostanku modela dodatne mrežice za ujednačavanje toka u kutiji difuzora.

LITERATURA

[1] Balen, I.: Podloge za predavanja iz kolegija „Klimatizacija“, FSB, Zagreb.

[2] Smoljan, D.: Razvoj matematičkog modela za ocjenu toplinske ugodnosti u spojenom mlazu, Zagreb, 2011.

[3] Virag, I., Šavar, M., Džijan, I. : Mehanika fluida I predavanja, FSB, Zagreb, 2017.

[4] Virag, I., Šavar, M., Džijan, I. : Mehanika fluida II predavanja, FSB, Zagreb, 2017.

[5] Virag, Z., Džijan, I. : Računalna Dinamika Fluida, FSB, Zagreb, 2014.

[6] https://www.openfoam.com/documentation/user-guide/standard-boundaryconditions.php

[7] https://www.klimaoprema.hr/

[8] OpenFOAM UserGuide version 7, 2019

[9] https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/doc/guide-turbulence-ras-k-omega-sst.html

[10] https://www.cfmesh.com

PRILOZI

I. CD-R disc