

Proračun aksijalnog ventilatora i određivanje radne karakteristike pomoću CFD analize

Semren, Marija

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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:235:369100>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-05-17**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Marija Semren

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Željko Tuković, dipl. ing.

Student:

Marija Semren

Zagreb, 2024.

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

Zahvaljujem se prof. Tukoviću na svoj pruženoj pomoći i mentorstvu. Zahvaljujem se Luki Balatincu, Mateju Čorku i Tessi Uroić za svu pomoć pri izradi rada.

Na kraju, zahvaljujem se svojoj obitelji, prijateljima i dečku na svoj potpori za vrijeme pohađanja fakulteta.

Marija Semren



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
Procesno-energetski, konstrukcijski, inženjersko modeliranje i računalne simulacije i brodstrojarski

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 24 - 06 / 01	
Ur.broj: 15 - 24 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Marija Semren** JMBAG: 0035213073

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Proračun aksijalnog ventilatora i određivanje radne karakteristike pomoću CFD analize**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Design of an axial fan and CFD analysis of the fan performance characteristic**

Opis zadatka:

Aksijalni ventilatori koriste se za transport zraka i drugih plinova za uvjete velikih protoka i relativno niskih prirasta tlaka. Osim osnovne izvedbe samo s radnim kolom, moguće su izvedbe aksijalnih ventilatora sa statorskim lopaticama ispred ili iza rotorskih lopatica, što povećava iskoristivost ventilatora te utječe na ostvareni prirast tlaka.

U okviru diplomskog rada potrebno je:

1. Oblikovati lopaticu rotora aksijalnog ventilatora primjenom metodologije koja se temelji na numerički određenim aerodinamičkim karakteristikama dvodimenzionalne rešetke lopatica, za zadani maksimalni promjer radnog kola 1242 mm, protok $23,8 \text{ m}^3/\text{s}$ te prirast zaustavnog tlaka 895 Pa.
2. Usporediti geometriju ventilatorske lopatice dobivene primjenom navedene metodologije s geometrijom lopatice dobivenom analitičkim proračunom.
3. Izraditi trodimenzionalni model cijelog radnog kola, napraviti proračunsku mrežu te odrediti karakteristiku aksijalnog ventilatora proračunom različitih radnih točaka ventilatora za zadanu brzinu vrtnje korištenjem stacionarnih metoda računalne dinamike fluida (CFD) za proračun nestlačivog strujanja u turbostrojevima.
4. Za konstrukciju ventilatora sa statorskim lopaticama ispred i iza radnog kola odrediti utjecaj na iskoristivost i ostvareni prirast tlaka za odabrane radne točke ventilatora.

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

Zadatak zadan:

16. studenoga 2023.

Datum predaje rada:

18. siječnja 2024.

Predviđeni datumi obrane:

22. – 26. siječnja 2024.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Željko Tuković

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

SAŽETAK.....	VI
SUMMARY	VII
1 VENTILATORI.....	1
1.1 Općenito	1
1.2 Cordierov dijagram	2
1.3 Podjela ventilatora prema smjeru strujanja	3
1.4 Karakteristika aksijalnog ventilatora	7
1.5 Prekid strujanja u ventilatoru (<i>stall</i>).....	7
1.6 Zagušenje strujanja	8
1.7 Pumpanje ventilatora.....	9
2 METODA KONTROLINIH VOLUMENA	11
2.1 Skalarna transportna jednačba	11
2.2 Temeljne jednačbe	13
2.3 Diskretizacija	14
2.3.1 Sustav linearnih jednačbi	16
2.4 Rubni uvjeti.....	17
2.5 Modeliranje turbulentnog strujanja.....	17
2.5.1 $k-\omega$ SST model turbulencije.....	18
2.6 Metoda pokretnog koordinatnog sustava	19
2.7 Matematički model strujanja za rotirajući koordinatni sustav	20
3 GEOMETRIJA	21
3.1 Oblikovanje rotora i statora.....	21
3.2 Prostorna domena.....	24
4 DISKRETIZACIJA PROSTORNE DOMENE.....	27
4.1 Rubni uvjeti.....	28
5 REZULTATI	33
5.1 Simulacija strujanja u aksijalnom ventilatoru bez usmjeravajućih statorskih lopatica.....	33
5.1.1 Nominalni protok, Q_n	33
5.1.2 10% Q_n	37
5.1.3 50% Q_n	39
5.1.4 110% Q_n	42
5.2 Aksijalni ventilator sa usmjeravajućim statorskim lopaticama ispred rotora	44
5.3 Aksijalni ventilator s usmjeravajućim statorskim lopaticama iza rotora	46
5.4 Izračun karakteristike ventilatora i usporedba učinkovitosti za slučaj s usmjeravajućim statorskim lopaticama.....	47
6 ZAKLJUČAK.....	50
7 LITERATURA	51

POPIS SLIKA

Slika 1.1 Sporohodno (lijevo), normalno (sredina) i brzohodno (desno) radijalno kolo	1
Slika 1.2 Cordierov dijagram	3
Slika 1.3 Centrifugalni ventilator [1]	4
Slika 1.4 Aksijalni ventilator [1]	4
Slika 1.5 Izvedbe jednostupanjskog aksijalnog ventilatora [2]	5
Slika 1.6 Trokut brzina izvedbe statora iza rotora [3]	6
Slika 1.7 Trokut brzina izvedbe stator ispred rotora [3]	6
Slika 1.8 Karakteristika aksijalnog ventilatora [3]	7
Slika 1.9 Širenje prekida strujanja (gore) i primjer rotirajućih segmenata djelomičnog prekida (dolje lijevo) i potpunog prekida (dolje desno) [3]	8
Slika 1.10 Primjer hidrodinamičkih karakteristika sobe	9
Slika 1.11 Primjer sobe s ugrađenim ventilatorom (lijevo) i karakteristika ventilatora (desno)	10
Slika 2.1 Kontrolni volumen [6]	15
Slika 3.1 Pogled na aeroprofile s gornje strane (lijevo) i presjeci lopatice (desno)	22
Slika 3.2 Rotor	23
Slika 3.3 Stator	23
Slika 3.4 Lopatica dobivena analitičkim proračunom [11]	24
Slika 3.5 Prostorna domena izvedbe sa rotorom	25
Slika 3.6 Prostorna domena izvedbe stator nizvodno	26
Slika 3.7 Prostorna domena izvedbe stator uzvodno	26
Slika 4.1 Diskretizacija prostorne domene	27
Slika 4.2 Diskretizacija prostorne domene kod rotora	29
Slika 4.3 Presjek diskretizacije prostorne domene	30
Slika 4.4 Detalj diskretizacije prostorne domene kod rotora	30
Slika 4.5 Presjek diskretizacije prostorne domene izvedbe stator uzvodno	30
Slika 4.6 Diskretizacija prostorne domene kod statora i rotora	31
Slika 4.7 Detalj diskretizacije prostorne domene kod statora i rotora	31
Slika 4.8 Diskretizacija prostorne domene – rotor i stator	32
Slika 4.9 Presjek diskretizacije prostorne domene izvedbe stator nizvodno	32
Slika 5.1 Polje brzine za nominalni protok	33
Slika 5.2 Polje tlaka za nominalni protok	33
Slika 5.3 Vektori brzine za nominalni protok	34
Slika 5.4 Tlak po površini rotora za nominalni protok	34
Slika 5.5 Presjeci domene	35
Slika 5.6 Udio aksijalne komponente brzine strujanja za nominalni protok na presjeku 1 (gore lijevo), 2 (gore desno) i 3 (dolje)	36
Slika 5.7 Polje brzine za 10% Q_n	37
Slika 5.8 Polje tlaka za 10% Q_n	37
Slika 5.9 Vektori brzine za 10% Q_n	38
Slika 5.10 Udio aksijalne komponente brzine strujanja za 10% Q_n na presjeku 1 (gore lijevo), 2 (gore desno) i 3 (dolje)	38
Slika 5.11 Tlak na površini rotora za 10% Q_n	39
Slika 5.12 Polje brzine za 50% Q_n	39
Slika 5.13 Polje tlaka za 50% Q_n	40
Slika 5.14 Vektori brzine za 50% Q_n	40

Slika 5.15 Udio aksijalne komponente brzine strujanja za 50% Q_n na presjeku 1 (gore lijevo), 2 (gore desno) i 3 (dolje)	41
Slika 5.16 Tlak na površini rotora za 50% Q_n	41
Slika 5.17 Polje brzine za 110% Q_n	42
Slika 5.18 Polje tlaka za 110% Q_n	42
Slika 5.19 Vektori brzine za 110% Q_n	42
Slika 5.20 Udio aksijalne komponente brzine strujanja za 110% Q_n na presjeku 1 (gore lijevo), 2 (gore desno) i 3 (dolje)	43
Slika 5.21 Tlak na površini za 110% Q_n	43
Slika 5.22 Polje brzine za izvedbu stator uzvodno	44
Slika 5.23 Polje tlaka za izvedbu stator uzvodno	44
Slika 5.24 Vektori brzine za izvedbu stator uzvodno	44
Slika 5.25 Udio aksijalne komponente brzine strujanja za izvedbu stator uzvodno na presjecima 2 (lijevo) i 3 (desno)	45
Slika 5.26 Tlak na površini statora i rotora	45
Slika 5.27 Polje brzine za izvedbu stator nizvodno	46
Slika 5.28 Polje tlaka za izvedbu stator nizvodno	46
Slika 5.29 Vektori brzine za izvedbu stator nizvodno	46
Slika 5.30 Udio aksijalne komponente brzine strujanja za izvedbu stator nizvodno na presjecima 2 (lijevo) i 3 (desno)	47
Slika 5.31 $Q - \Delta p$ i $Q - \eta$ karakteristike	48
Slika 5.32 Usporedba učinkovitosti izvedbe bez usmjeravajućih statorskih lopatica s izvedbama sa statorskim lopaticama ispred i iza rotora	49

POPIS TABLICA

Tablica 1. Geometrijski parametri rotora	22
Tablica 2. Geometrijski parametri statora	22
Tablica 3. Geometrijski parametri prostorne domene	25
Tablica 4. Parametri mreže.....	27
Tablica 5. Pregled rubnih uvjeta	28
Tablica 6. Razlike tlakova i učinkovitosti	48
Tablica 7. Učinkovitosti pojedinih izvedbi : izvedba bez usmjeravajućih statorskih lopatica, izvedba sa usmjeravajućim statorskim lopaticama ispred rotora i izvedba sa usmjeravajućim statorskim lopaticama iza rotora	49

POPIS OZNAKA

A	Površina	m^2
D	Promjer	m
F	Sila	N
g	Akceleracija sile teže	m/s^2
I	Intenzitet turbulencije	$\%$
k	Turbulentna kinetička energija	m^2/s^2
L	Duljina	m
M	Moment	Nm
\dot{m}	Maseni protok	kg/s
n	Broj okretaja	-
P	Snaga	W
p	Tlak	Pa
Q	Protok	m^3/s
R	Polumjer	m
U	Brzina	m/s
y^+	Bezdimenzijska udaljenost između centra ćelije od zida	-
η	Učinkovitost	$\%$
μ	Dinamička viskoznost	Pas
ν	Kinematička viskoznost	m^2/s
ρ	Gustoća	kg/m^3
ω	Kutna brzina	s^{-1}
ω	Specifična brzina turbulentne disipacije	s^{-1}

SAŽETAK

Zadatak ovog diplomskog rada bio je konstruirati statorske i rotorske lopatice aksijalnog ventilatora te izraditi CAD model rešetke rotora i statora za CFD simulacije strujanja kroz ventilator.

Oblikovanje profila rotorskih i statorskih lopatica aksijalnog ventilatora izvedeno je koristeći metodologiju temeljenu na numerički određenim aerodinamičkim karakteristikama, uz primjenu uvjeta slobodnog vrtloga. Oblik lopatica dobiven numeričkim proračunom uspoređen je s oblikom lopatica dobivenim analitičkim proračunom. Provedeno je šest simulacija računalne dinamike fluida s različitim protocima i konstantnom brzinom vrtnje rotora u računalnom programu OpenFOAM® te su na temelju simulacija određeni prorasti totalnog tlaka i promjene statičkog tlaka i brzine uzvodno i nizvodno od ventilatora. Usporedbom izračunate snage konstruiranog ventilatora s komercijalnim ventilatorom sličnih dimenzija, dobivena je učinkovitost.

Dodatno, provedene su dvije dodatne simulacije izvedbi sa usmjeravajućim statorskim lopaticama ispred i iza rotora kako bi se mogla usporediti slika strujanja i usporediti učinkovitost izvedbi.

Na temelju podataka dobivenih analizom rezultata numeričkih simulacija za različite protoke, izračunate su radne karakteristike te je konstruirana krivulja učinkovitosti ventilatora.

Ključne riječi: aksijalni ventilator, radna karakteristika ventilatora, simulacija strujanja u ventilatoru, OpenFOAM.

SUMMARY

The task of this master's thesis was to construct the stator and rotor blades of an axial fan and to create a CAD model of the rotor and stator grid for CFD simulations of flow through the fan. The shaping of the profiles of the rotor and stator blades of the axial fan was carried out using a methodology based on numerically determined aerodynamic characteristics, with the application of free vortex conditions. The blade shapes obtained through numerical calculations were compared with those obtained through analytical calculations. Six computational fluid dynamics simulations were conducted with different flow rates and a constant rotor rotation speed using the OpenFOAM® software. Based on these simulations, the increases in total pressure and changes in static pressure and velocity upstream and downstream of the fan were determined. Efficiency was obtained by comparing the calculated power of the constructed fan with that of a commercially available fan of similar dimensions.

Additionally, two extra simulations were performed with guiding stator blades in front of and behind the rotor to compare the flow patterns and assess the efficiency of these configurations. Based on the data obtained from the analysis of results of numerical simulations for various flow rates, the operating characteristics were calculated, and the efficiency curve of the fan was constructed.

Keywords: axial fan, fan operating characteristic, simulation of airflow through a fan, OpenFOAM.

1 VENTILATORI

1.1 Općenito

Ventilatori su strojevi koji predaju mehaničku energiju zraku (ili nekom drugom plinu), pretvarajući je u potencijalnu energiju (energiju tlaka) i kinetičku energiju (brzinu strujanja). Ta energija se koristi isključivo za prevladavanje otpora sustava u koji je ventilator ugrađen. Ventilatori rade na niskom tlaku, s fluidima malih gustoća, što omogućuje jednostavnu i lagano izvedivu konstrukciju. Najčešće su napravljeni od lima postupkom zavarivanja kako bi se formirale funkcionalne jedinice. Zbog naglaska na jednostavnoj tehnologiji izrade, hidrodinamika strujnih dijelova je zanemarena, što rezultira nižom efikasnošću u usporedbi s drugim uređajima.

Postoji više podjela ventilatora, a jedna od njih je prema brzohodnosti tj. prema Cordierovom dijagramu na:

- Sporohodni radijalni ventilatori ($\sigma < 0.2$)
- Radijalni ventilatori ($0.2 < \sigma < 0.5$)
- Bubnjasti ventilatori ($0.5 < \sigma < 0.7$)
- Aksijalni ventilatori ($\sigma > 0.7$)
- Ventilatori posebnih namjena



Slika 1.1 Sporohodno (lijevo), normalno (sredina) i brzohodno (desno) radijalno kolo

1.2 Cordierov dijagram

Konstrukcija visokoučinkovitih ventilatora često ovisi o iskustvu inženjera. Za određivanje ključnih dimenzija, najčešće se koristi Cordierov dijagram. Za određenu radnu točku (kao što su protok zraka, tlak i brzina rotacije), može se odrediti optimalan promjer ventilatora. Iako Cordierov dijagram pruža odnose između različitih parametara kao što su protok, tlak, brzina rotacije i promjer, ne daje detalje o obliku lopatica. Kao nadopuna, postoje empirijski algoritmi konstruiranja uz analitički proračun prema potrebnim parametrima rada.

Za klasifikaciju se koriste bezdimenzijski parametri brzohodnosti i promjera (označenim kao σ i δ) prema kojima radna kola različitih tipova turbostrojeva zauzimaju određene raspone Cordierovom dijagramu. Kroz analizu integralnih parametara protoka i geometrije turbostroja, može se zaključiti i o očekivanim performansama stroja.

Cordierov dijagram povezuje optimalne radne uvjete (volumenski protok Q_{opt} i specifično opterećenje Y) s optimalnim promjerom D i brzinom vrtnje n , za jednostupanjske strojeve koji rade pri maksimalnoj učinkovitosti.

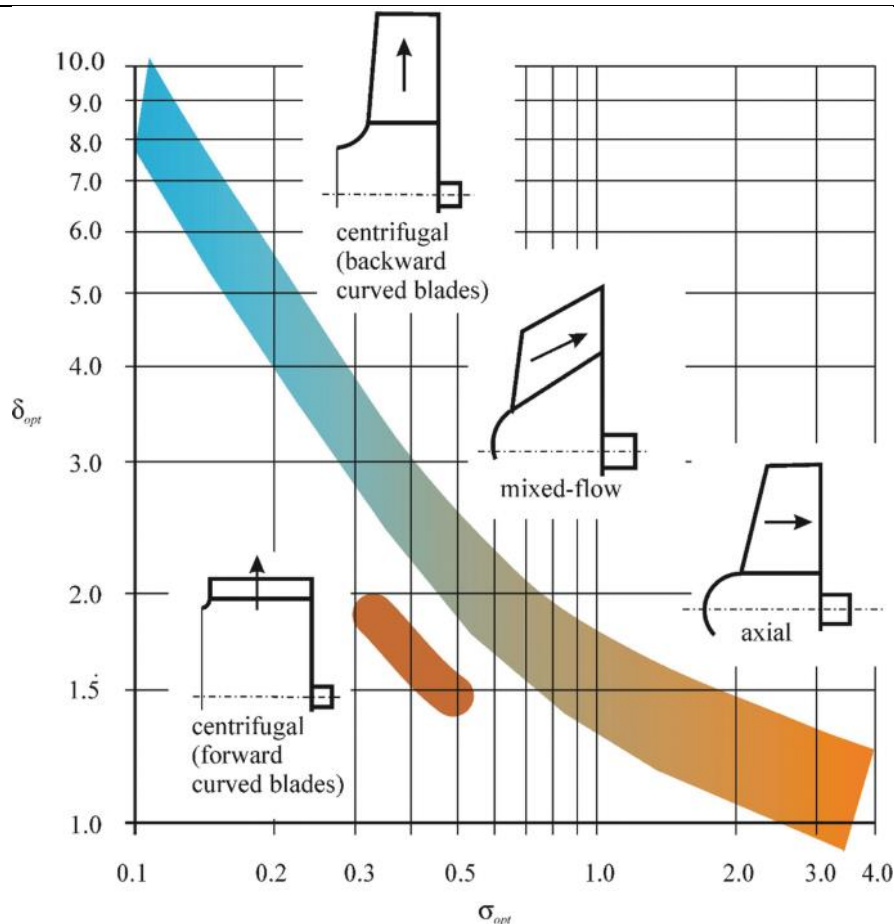
$$Y = \frac{\Delta p_{opt}}{\rho} \quad (1.1)$$

Koeficijent σ označava brzinu strujanja i definira se:

$$\sigma = 2\sqrt{\pi}n \frac{\sqrt{Q}}{(2Y)^{3/2}}, \quad (1.2)$$

dok se koeficijent za promjer δ definira kao:

$$\delta = \frac{\sqrt{\pi}}{2} D^4 \sqrt{\frac{2Y}{Q^2}}. \quad (1.3)$$



Slika 1.2 Cordierov dijagram

1.3 Podjela ventilatora prema smjeru strujanja

Ovisno o smjeru strujanja kroz rotor, ventilatori se dijele na:

- Centrifugalni (radijalni)
- Aksijalni

Ulaz u centrifugalne ventilatore je aksijalan dok je izlaz radijalan.

Kod aksijalnih ventilatora i ulaz i izlaz su aksijalni. Aksijalni ventilatori koriste se za dobavu zraka i drugih plinova, pri velikim protocima i relativno niskim tlakovima. Po principu rada i konstrukciji vrlo su slični aksijalnim pumpama. Nakon aksijalno usmjerenog usisa, struji zraka se povećava brzina, dok po energetske jednačbi tlak pada, ali zaustavni, tj. totalni tlak raste. Veliki aksijalni ventilatori obično su opremljeni zavarenim, a ponekad i kovanim glavinama. Rotorske lopatice su većinom lijevane od aluminija. Kod mnogih ventilatora moguće je mijenjati kut rotorskih lopatica dok miruju, pojedinačno ili simultano putem ovratnika s ručkama, prilagođavajući rad stroja promijenjenom protoku. Standardna konfiguracija uključuje rotor s nizvodnim satorom.



Slika 1.3 Centrifugalni ventilator [1]

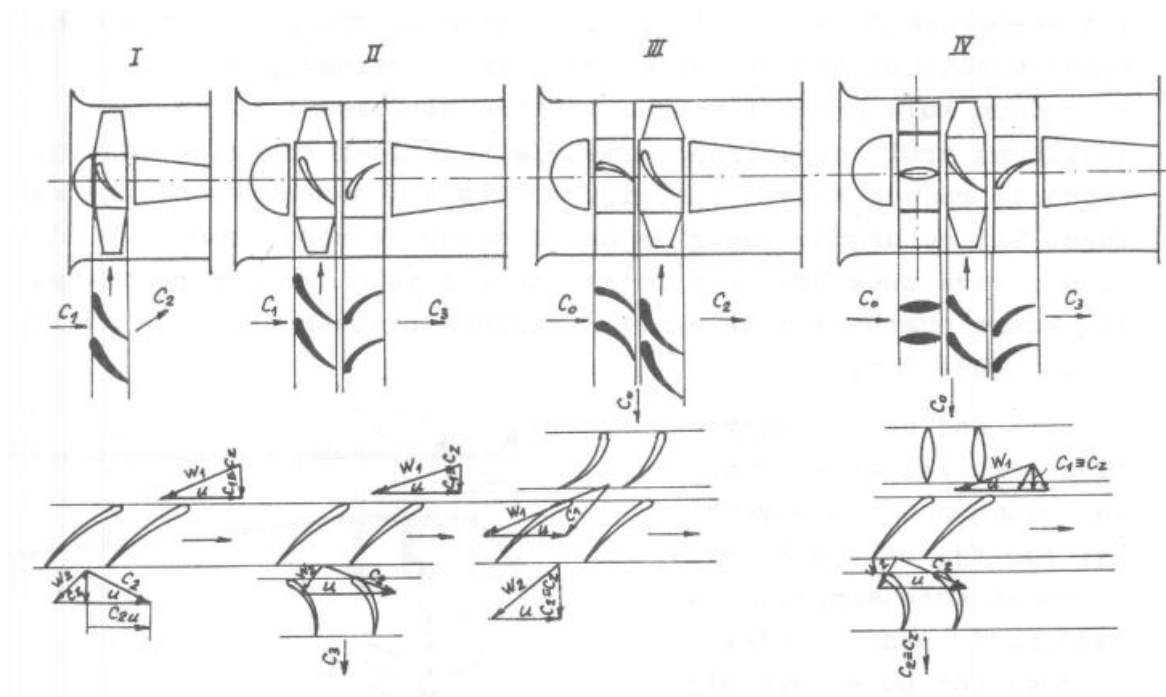


Slika 1.4 Aksijalni ventilator [1]

Ventilator s visokim prirastom tlaka istovremeno karakterizira nizak protok zraka, što rezultira visokim omjerom promjera glavčine i vrha lopatica. S druge strane, ventilator s niskim prirastom tlaka obično ima nizak omjer promjera.

Jednostupanjski aksijalni ventilator u svojoj konstrukciji ima samo jedan rotor, a može i ne mora imati i stator. Postoji više izvedbi, a ovisno o uvjetima strujanja koje je potrebno ostvariti moguće su slijedeće izvedbe:

- bez usmjeravajućih statorskih lopatica,
- s usmjeravajućim statorskim lopaticama ispred rotora,
- s usmjeravajućim statorskim lopaticama iza rotora,
- s usmjeravajućim statorskim lopaticama ispred i iza rotora.



Slika 1.5 Izvedbe jednostupanjskog aksijalnog ventilatora [2]

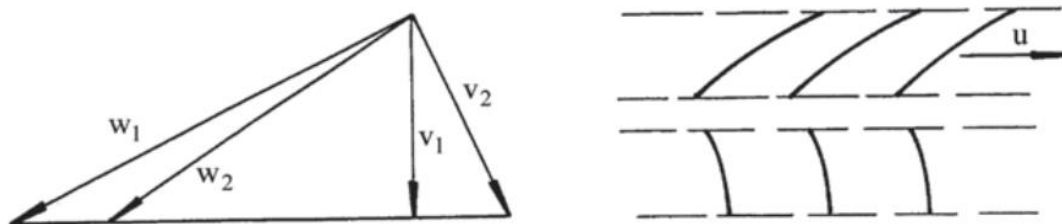
Stupanj reaktivnosti za aksijalni ventilator, gdje c_z označava apsolutnu brzinu zraka, kada je $c_{1z} = c_{2z}$ i $c_{1u} = 0$:

$$r = 1 - \frac{c_{1u} + c_{2u}}{2u} \quad (1.4)$$

I kada je $c_{1u} = 0$:

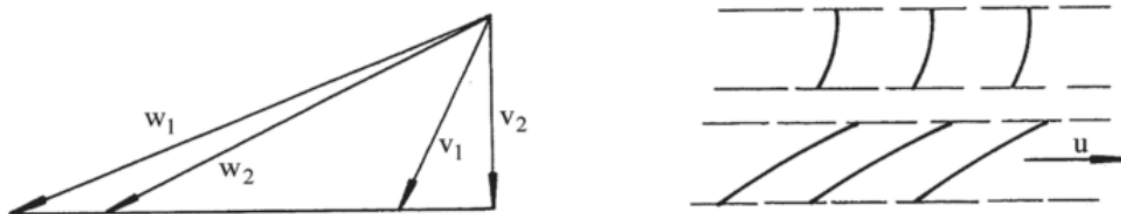
$$r = 1 - \frac{c_{2u}}{2u} \quad (1.5)$$

Kod ventilatora s velikim stupnjem reaktivnosti primjenjuje se izvedba bez statora. Stator iza rotora ima ulogu difuzora te ima ulogu ponovnog uspostavljanja aksijalnog strujanja. Ova izvedba se koristi kod ventilatora koji imaju mali stupanj reaktivnosti, jer je omjer c_{2u}/u puno veći. Stupanj korisnosti ovih ventilatora je veći u usporedbi s onima bez statora [2].



Slika 1.6 Trokut brzina izvedbe statora iza rotora [3]

U izvedbi ventilatora gdje se stator nalazi ispred rotora, nepomične statorske lopatice usmjeravaju strujanje suprotno od smjera rotacije rotora, tj. $c_{1u} < 0$. Isto kao u prethodnoj izvedbi, strujanje nakon rotora je aksijalno jer se lopatice rotora izvode na način da se poništi obodna komponenta strujanja, $c_{2u} = 0$. Prema jednažbi reaktivnosti, $c_{1u} < 0$ pa slijedi da je stupanj reaktivnosti $r > 1$.



Slika 1.7 Trokut brzina izvedbe statora ispred rotora [3]

Stupanj učinkovitosti ove izvedbe ventilatora je manji od izvedbe sa statorom prije rotora, ali pri istim izvedbenim dimenzijama ostvaruju veće tlakove zbog velikog iznosa relativne brzine na ulazu u rotor.

$$\Delta p_k = \rho \cdot u \cdot (c_{2u} - c_{1u}) \quad (1.6)$$

Budući da je po ovoj shemi $c_{1u} < 0$ vrijedi:

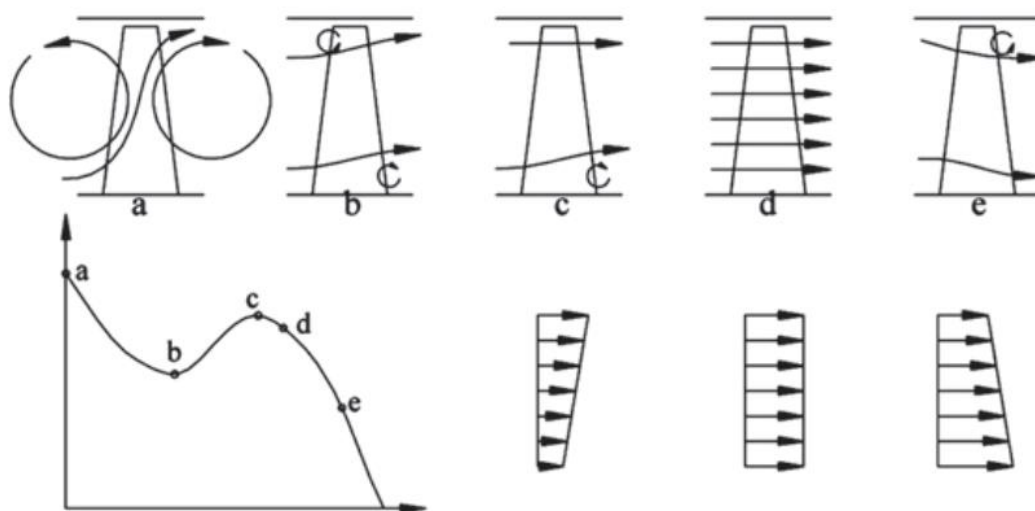
$$\Delta p_k = \rho \cdot u \cdot [c_{2u} - (-c_{1u})] = \rho \cdot u \cdot (c_{2u} + c_{1u}) \quad (1.7)$$

Izvedba sa statorom ispred i iza rotora objedinjuje prethodne tri izvedbe. Izvedba sa statorom ispred obično se izvodi od simetričnih aeroprofila i skreće strujanje u suprotnom smjeru od rotacije rotora. Zakretanjem lopatica regulira se protok u ventilatoru.

1.4 Karakteristika aksijalnog ventilatora

Slika 1.8 prikazuje skicu promjene ukupnog porasta tlaka u odnosu na protok, odnosno karakteristiku ventilatora. Karakteristična krivulja je skup radnih točaka ventilatora te ima maksimum i minimum. Slike 1.6 i 1.7 pokazuju da se smanjenjem protoka (s istim smjerom v_I) povećava napadni kut strujanja koja ulazi u rotor. To povećava odstupanje rotora i time rad rotora. Napadni kut na statoru, ako je nizvodno, također se povećava (s istim smjerom w_2). Smanjenje protoka zraka stoga povećava rad rotora, ali dolazi do odvajanja graničnog sloja ispod određenog protoka, unutar rotora ili statora, što smanjuje ukupni porast tlaka.

Međutim, ukupni porast tlaka veći je pri vrlo niskom protoku. Zbog centrifugalne sile, dolazi do porasta tlaka u struji. [3].

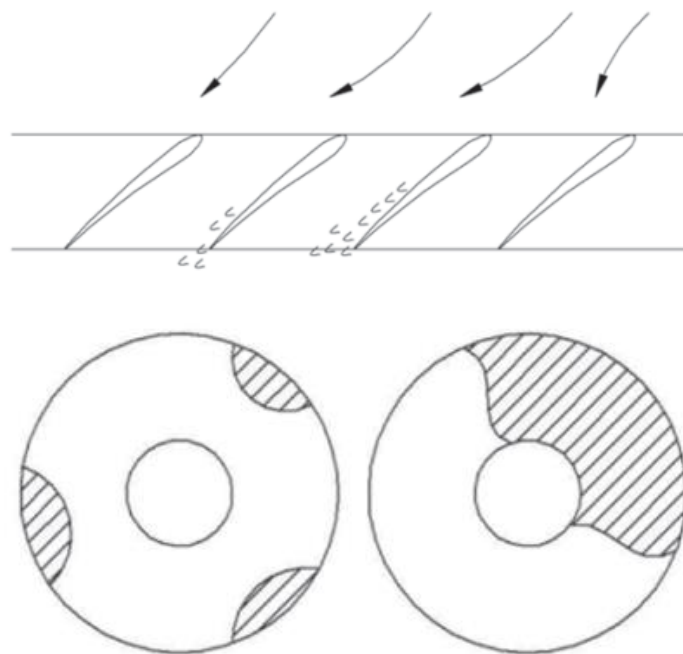


Slika 1.8 Karakteristika aksijalnog ventilatora [3]

1.5 Prekid strujanja u ventilatoru (*stall*)

Prekid strujanja (eng. *stall*) je pojava koja se javlja kada postoji neujednačen protok zraka kroz lopatice ventilatora. To je vrsta nestabilnosti strujanja koja dovodi do lokaliziranih područja smanjenog protoka ili protoka u suprotnom smjeru stroju. Ne javlja se istovremeno na svim lopaticama ventilatora. Kad se protok u sustavu smanjuje, prekid strujanja će prvo zahvatiti vrhove lopatica zbog promjene napadnog kuta relativne brzine strujanja. Prekid strujanja zahvaća nekoliko susjednih kanala, odnosno samo segment ventilatora koji rotira. Primjeri segmenta s prekidnom strujanja prikazani su na prikazane su šrafirane površine zone male aksijalne brzine uzrokovane prekidom. Tipična brzina segmenta s djelomičnim zastojem iznosi

otprilike 50% brzine rotora, dok se potpuni prekid obično događa u samo jednom kanalu, s vrijednosti brzine 20–40% brzine rotora [3].



Slika 1.9 Širenje prekida strujanja (gore) i primjer rotirajućih segmenata djelomičnog prekida (dolje lijevo) i potpunog prekida (dolje desno) [3]

Mehanizam širenja segmenata s prekidom strujanja može se interpretirati pomoću. Ako prekid nastane na određenoj lopatici, odnosno međulopatičnom kanalu, mijenja se protok kroz ravninu ventilatora, stvarajući uvjete za prekid strujanja u susjednom međulopatičnom kanalu. Širenje prekida po segmentima u relativnom koordinatnom sustavu suprotno je smjeru rotacije. Brzina širenja manja je od brzine lopatica, što uzrokuje kretanje segmenata prekida u smjeru rotacije u apsolutnom koordinatnom sustavu

1.6 Zagušenje strujanja

Smanjenjem tlaka iza ventilatora, povećava se protok i brzina raste sve dok ne dosegne vrijednost brzine zvuka u određenom dijelu prolaznog toka. Daljnjim smanjenjem tlaka nizvodno, protok se više ne povećava. Ovaj fenomen naziva se zagušenje (eng. *choke*). Protok zagušenja ovisi o brzini vrtnje, kako za zagušenje u kanalima između rotornih lopatica, tako i za zagušenje u kanalima između statorskih lopatica.

$$\dot{m} = A_1 \rho c = A_1 \rho_{01} c_{01} \left(\frac{\rho}{\rho_{01}} \right) \left(\frac{c}{c_{01}} \right) = A_1 \rho_{01} c_{01} \left(\frac{h}{h_{01}} \right)^{\frac{1}{n-1} + \frac{1}{2}} \quad (1.8)$$

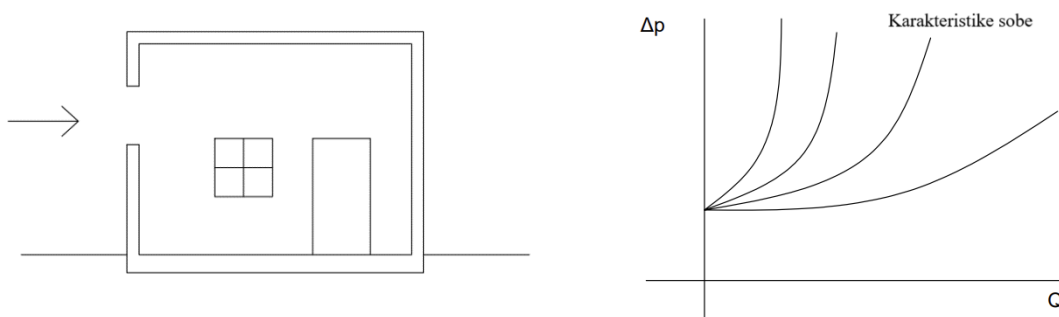
$$\dot{m} = A_2 \rho_{01} c_{01} \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{1}{n-1} + \frac{1}{2}} \left[1 + (\gamma - 1) \psi \frac{u_2^2}{c_{01}^2} \right]^{\frac{1}{n-1} + \frac{1}{2}} \quad (1.9)$$

Površina rotorskog presjeka manja je od statorske, budući da brzina rotora ima veću tangencijalnu komponentu od brzine u statoru. To znači da je rotor tipično najkritičniji s obzirom na zagušenje.

Gornje jednadžbe pokazuju da zagušenje masenog protoka ovisi o brzini vrtnje. Dobiveni izrazi su približni, s obzirom da se pretpostavlja jednodimenzijско strujanje. Druga pretpostavka je da je ulaz u rešetku čisto aksijalan [3].

1.7 Pumpanje ventilatora

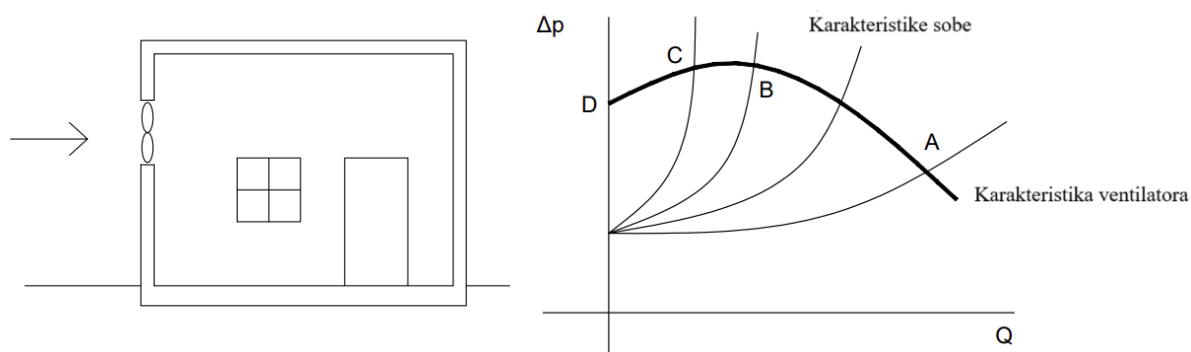
Za razliku od pumpi, kod ventilatora iz konstrukcijskih i ekonomskih razloga uglavnom se dobivaju dvoznačne, odnosno višeznačne (kod aksijalnih ventilatora), $Q - \Delta p$ karakteristike. To znači da lijevo od maksimalnog prirasta tlaka (područje manjih protoka), postoji mogućnost nestabilnog, odnosno labilnog rada ventilatora. Pojava je povezana s jakim periodičkim pulzacijama tlaka, u praksi poznata kao pumpanje ventilatora.



Slika 1.10 Primjer hidrodinamičkih karakteristika sobe

Soba ima vrata i otvor kroz koji ulazi zrak iz okolišne atmosfere. Kad su vrata i prozor zatvoreni, u sobi se uspostavlja pretlak zastoja. Ako se malo otvori prozor, kroz sobu će poteći

zrak i kao posljedica toga uspostaviti će se tlak viši od tlaka zastoja, kako bi se kroz sobu i prozor (vrata) osigurao protok zraka. Ako se nastavi s otvaranjem prozora, a kasnije i vrata (promjena karakteristike sobe s djelomično otvorenim prozorom ili vratima), tlak će se mijenjati shodno stupnju otvorenosti prozora ili vrata. Soba ima svoje hidrodinamičke karakteristike.



Slika 1.11 Primjer sobe s ugrađenim ventilatorom (lijevo) i karakteristika ventilatora (desno)

Ako se u promatrani otvor ugradi ventilator, onda se u sobu upuhuje zrak po karakteristici ventilatora. Karakteristike sobe i ventilatora sijeku se u točkama A, B, C i D (D kada su prozor i vrata potpuno zatvoreni).

Ako u točki A trenutačno poraste potrošnja za ΔQ (više se otvore vrata), dolazi do pada tlaka Δp u sobi i u ventilatoru, pa će se radna točka premjestiti u desno od točke A. Isto vrijedi ako se trenutačno smanji potrošnja za ΔQ što će dovesti do prirasta tlaka Δp , odnosno radna točka će se premjestiti lijevo od točke A.

Ako se promotri identičan slučaj rada ventilatora u točki C, trenutačno povećanje potrošnje fluida za ΔQ izazvat će pad tlaka u sobi. No, to ventilator ne može podnijeti, jer padom tlaka, na tom dijelu krivulje $Q - \Delta p$, karakteristika dobavne količine pada. Tada će ventilator početi vrlo brzo raditi u točki D, to jest dobavom $Q = 0$. U sobi će tlak padati dok se ne postane niži tlak od onog koji odgovara tlaku točke D (pri dobavi $Q = 0$). Tog trenutka ventilator počinje raditi na dijelu karakteristike A–B, pri čemu dobavlja količinu veću od potrošnje pa tlak u sobi raste dok se ne postigne stanje koje odgovara trenutačnoj potrošnji (točka C).

Svaki daljnji poremećaj u protoku ponovno izaziva ovakav proces. Ova pojava naziva se pumpanjem ventilatora. Prilikom projektiranja ventilatorskih postrojenja izbjegava se njihov rad u području lijevo od točke B [4].

2 METODA KONTROLINIH VOLUMENA

2.1 Skalarna transportna jednadžba

Ako se Reynoldsov transportni teorem (RTT) primijeni na relevantno područje prostora prilikom analize određenog problema, može se koristiti kako bi se opisala promjena općeg svojstva ϕ unutar tog prostora (kontrolni volumen, KV). Kontrolni volumen predstavlja zatvoreni sustav gdje je promjena općeg svojstva ϕ jednaka zbroju promjene svojstva unutar KV-a i neto odljeva kroz površine koje definiraju kontrolni volumen. RTT za KV, može se izraziti [5]:

$$\frac{d}{dt} \int_{V_m} \phi dV = \int_{V_m} \frac{\partial \phi}{\partial t} dV + \oint_{S_m} \phi (\mathbf{n} \cdot \mathbf{u}) dS. \quad (2.1)$$

Zatim se mora uvesti opći oblik Gaussovog teorema za transformaciju površinskog integrala:

$$\int_{V_p} \nabla \cdot \mathbf{a} dV = \oint_{\partial V_p} d\mathbf{s} \cdot \mathbf{a} = \oint_{\partial V_p} d\mathbf{n} \cdot \mathbf{a} dS. \quad (2.2)$$

Uvrštavanjem jedne jednadžbe u drugu dobiva se volumni integral Reynoldsovog transportnog teorema:

$$\frac{d}{dt} \int_V \phi dV = \int_V \left[\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi \mathbf{u}) \right] dV, \quad (2.3)$$

koji se koristi za modeliranje konvektivnog prijenosa općeg svojstva ϕ konvektivnom brzinom \mathbf{u} . Priljev općeg svojstva ϕ odvija se prema izrazu $(\mathbf{u} \cdot \mathbf{n}) < 0$, dok je odljev označen izrazom $(\mathbf{u} \cdot \mathbf{n}) > 0$.

Osim konvektivnog prijenosa, i površinski i volumenski izvori također pridonose promjeni općeg svojstva unutar kontrolnog volumena (KV). Doprinos površinskih i volumenskih izvora, dan je izrazom:

$$\frac{d}{dt} \int_{V_m} \phi dV = \int_V q_v dV - \oint_S (\mathbf{n} \cdot \mathbf{q}_s) dS. \quad (2.4)$$

Primjenom Gaussovog teorema na izraz za izvor u jednadžbi 2.4, usklađivanjem lijeve strane rezultirajuće jednadžbe s jednadžbom 2.3 i integriranjem po volumenu KV-a ($V = \text{konstanta}$), dobiva se jednadžba:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi u) = q_v - \nabla \cdot q_s. \quad (2.5)$$

Izrazi koji predstavljaju površinske izvore, a djeluju na površini S kontrolnog volumena (KV), modeliraju se pomoću difuznog prijenosa. Fizikalno, opće svojstvo ϕ u zatvorenom području (KV) prenosit će se iz područja veće koncentracije prema područjima niže koncentracije dok se ne postigne jednoličnost. Model difuzije temelji se na činjenici da $\nabla \phi$ pokazuje smjer veće koncentracije svojstva ϕ i činjenici da difuzni prijenos nastaje u suprotnom smjeru, kontroliran difuznošću γ [5]:

$$q_s = -\gamma \nabla \phi. \quad (2.6)$$

Spajanjem dvije jednadžbe dobije se opći oblik skalarne transportne jednadžbe:

$$\underbrace{\frac{\partial \phi}{\partial t}}_{\text{vremenska derivacija}} + \underbrace{\nabla \cdot (\phi u)}_{\text{konvekcijski član}} - \underbrace{\nabla \cdot (\gamma \nabla \phi)}_{\text{difuzijski član}} = \underbrace{q_v}_{\text{izvor}}. \quad (2.7)$$

Vremenska derivacija iz jednadžbe 2.7 predstavlja inerciju sustava, tj. sposobnost sustava (KV) da akumulira opće svojstvo. Konvekcijski član predstavlja transformaciju koordinata svojstva, odnosno količinu svojstva ϕ transportiranu u ili iz sustava brzinom u . Difuzijski član predstavlja transport gradijenta svojstva ϕ , definirajući količinu ϕ transportiranu difuzivnim prijenosom. Na kraju, izrazi izvora (ili ponora) definiraju lokalnu proizvodnju i/ili uništavanje opće svojstvene veličine ϕ .

2.2 Temeljne jednačbe

Skalarna transportna jednačba je jedna od najbitnijih konstitucijskih jednačbi mehanike kontinuuma. Zamjenom općeg svojstva ϕ drugim svojstvima dobivaju se ostale konstitucijske jednačbe mehanike kontinuuma:

Zakon očuvanja mase

Uvrštavanjem gustoće fluida ρ umjesto općeg svojstva ϕ i definiranjem izvorskog člana s nultom vrijednosti dobije se zakon očuvanja mase:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0. \quad (2.8)$$

U slučaju nestlačivog strujanja, gustoća se može zapisati kao $\rho = \text{konst.}$, tako se pojednostavljuje gornji izraz:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0. \quad (2.9)$$

Zakon očuvanja momenta količine gibanja

Zamjenom općeg svojstva ϕ vektorom gibanja $\rho \mathbf{u}$ dobije se:

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = \underbrace{\rho \mathbf{g}}_{\text{gravitacijske sile}} + \underbrace{\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}}_{\text{površinske sile}}. \quad (2.10)$$

Ako se zanemari gravitacijski član za CFD nestlačivo strujanje turbostrojeva:

$$\underbrace{\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t}}_{\text{lokalni produkt}} + \underbrace{\nabla \cdot (\mathbf{u} \mathbf{u})}_{\text{konvekcija}} - \underbrace{\nabla \cdot (\nu_{eff} \nabla \mathbf{u})}_{\text{difuzija}} = - \underbrace{\nabla \frac{p}{\rho}}_{\text{gradijent tlaka}}, \quad (2.11)$$

gdje je Cauchyjev tenzor naprezanja dan kao zbroj gradijenta tlaka ∇p i tenzora viskoznog naprezanja predstavljen u difuzijskom članu. Treba napomenuti da se brzina fluida \mathbf{u} pojavljuje u jednačbi 2.11 kao transportna i transportirana varijabla, čineći konvekcijski izraz nelinearnim [6].

Zakon očuvanja energije

Ako se opći član ϕ zamijeni specifičnom unutrašnjom energijom ρe te se izrazi izvora/ponora postave kao zbroj snage različitih sila koje djeluju na kontrolni volumen (KV) i neto toka topline definiranog specifičnim toplinskim tokom \mathbf{q} i volumetrijskim izvorom topline Q , tada se može formulirati jednadžba koja opisuje očuvanje energije:

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho e \mathbf{u}) = \underbrace{\rho \mathbf{g} \cdot \mathbf{u}}_{\text{gravitacijski član}} + \underbrace{\nabla \cdot (\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{u})}_{\text{površinske sile}} - \underbrace{\nabla \cdot \mathbf{q} + \rho Q}_{\text{neto toplinski tok}}. \quad (2.12)$$

2.3 Diskretizacija

Da bi jednadžbe koje su prezentirane u prethodnom poglavlju mogle biti implementirane u CFD programskom paketu poput paketa `foam-extend`[7], potrebno je provesti diskretizaciju. Proces diskretizacije omogućava numeričko rješavanje skalarne transportne jednadžbe i jednadžbi koje proizlaze iz nje. Diskretizacijski proces sastoji se od prikazivanja diferencijalnih jednadžbi kao algebarskih izraza ekvivalentnih svojstava, obično u obliku matrice. Diskretizacija transportne jednadžbe u paketu `foam-extend` izvodi se u nekoliko koraka [5]:

- Diskretizacija po operatorima izvodi se evaluacijom svakog pojedinog člana eksplicitno prema unaprijed određenoj strategiji.
- Prostorna diskretizacija izvodi se upotrebom računalne mreže.
- Vrijeme se diskretizira serijom vremenskih koraka koji se zbrajaju kako bi činili promatrani vremenski interval.
- Prostorne i temporalne varijacije svojstva ϕ koriste se za diskretno prikazivanje podataka polja.
- Provodi se integracija preko ćelije (KV).
- Prostorne i temporalne varijacije koriste se za diskretnu interpretaciju operatora.

Osnova diskretizacijskog procesa je definiranje prostorne i vremenske domene koja će se koristiti. Vremenska domena definirana je promatranjem odabranog vremenskog intervala kao niz uzastopnih vremenskih koraka. Prostorna domena predstavljena je konačnim brojem kontrolnih volumena.

Poliedarska ćelija volumena V_P definirana je težištem KV P i vektorom položaja centra r_P u odnosu na ishodište globalnog koordinatnog sustava. Za odabranu stranu KV f definiran je vektor normale površine s_f s magnitudom jednakom površini odabrane strane S_f . Svaka susjedna ćelija ima težište N povezan s težištem glavne KV P putem delta vektora $d_f = \overline{PN}$ [5].

Definicija težište KV P kao glavne računalne točke glasi:

$$\int_{V_P} (x - x_P) dV = 0, \quad (2.13)$$

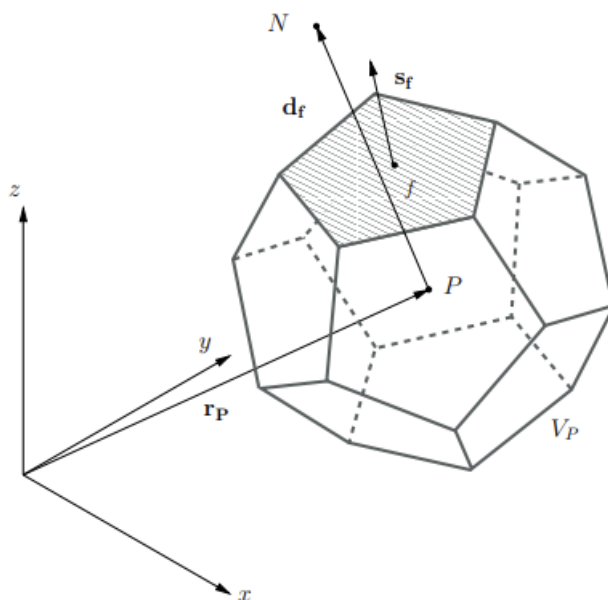
centar plohe f je definiran na isti način:

$$\int_{S_f} (x - x_P) dS = 0. \quad (2.14)$$

Plohe poliedarske KV nisu ravne površine, što znači da se vektor normale mora izračunati iz danog integrala:

$$s_f = \int_{S_f} n dS. \quad (2.15)$$

Rješenja diskretiziranih jednadžbi pohranjena su u težištu KV dok su granični podaci pohranjeni u središtima graničnih ploha. Ako je potrebno doći do podataka pohranjenih u središtima ploha KV, do istih se dolazi interpolacijskim shemama.



Slika 2.1 Kontrolni volumen [6]

Diskretizirana skalarna transportna jednačba glasi:

$$\int_V \frac{\partial \phi}{\partial t} dV + \oint_S \phi(\mathbf{n} \cdot \mathbf{u}) dS - \oint_S \gamma(\mathbf{n} \cdot \nabla \phi) dS = \int_V Q_v dV . \quad (2.16)$$

Rezultat je transformacija jednačbe iz diferencijalne jednačbe u skup algebarskih jednačbi riješenih u obliku matrice.

2.3.1 Sustav linearnih jednačbi

Sustav linearnih jednačbi razvija se diskretizacijom skalarne transportne jednačbe 2.7. Linearna jednačba rješava se za svaku računalnu točku (težište KV P), pri čemu rješenje jednačbe ovisi o vrijednostima susjednih težišta KV N. Opći oblik linearne jednačbe za težište KV P je:

$$a_P x_P + \sum_N a_N x_N = b. \quad (2.17)$$

Za svaki put kada x_P ovisi sam o sebi, doprinos je dodan u a_P i za svako vrijeme kada x_N ovisi sam o sebi, doprinos je dodan u a_N . Ostali doprinosi su dodani u b . Ako se gornja jednačba razvije za svaki KV u domeni, dobije se sustav linearnih jednačbi koji se obično zapisuje u formi matrice:

$$[A][x] = [b]. \quad (2.18)$$

Matrica $[A]$ sadrži koeficijente a_P i a_N , vektor $[x]$ sadrži vrijednosti x_P za sve KV u domeni, a vektor $[b]$ predstavlja desnu stranu. Kako domena sadrži veliki broj KV, svaki opisan zasebnom linearnom jednačbom, matrica $[A]$ ima dimenziju $N \times N$ KV-a, čineći ju kvadratnom matricom. Rezultirajuća matrica može biti velika, ali mnogi koeficijenti su jednaki nuli i matrica je rijetka, pri čemu je broj članova većih od nule u svakom retku jednak broju lica KV.

2.4 Rubni uvjeti

Sustav diferencijalnih jednadžbi ima beskonačno mnogo rješenja, stoga je potrebno unijeti rubne uvjete, tj. uvjete na granicama domene, kako bi se sustav odredio. Rubne uvjete treba postaviti za sve varijable koje se rješavaju, na svim granicama domene. U nastavku su navedeni najčešće korišteni rubni uvjeti:

- *Dirichletov*, koji zadaje fiksnu vrijednost varijable na granici:

$$\phi = \text{const.} \quad (2.19)$$

- *Neumannov*, koji zadaje nulti gradijent na granici:

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{q}_S = 0. \quad (2.20)$$

- Opći *Neumannov*, koji zadaje fiksni gradijent na granici:

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{q}_S = q_b. \quad (2.21)$$

- Opći *Robinov* ili miješani, koji je kombinacija *Dirichletov* i *Neumannovog* uvjeta

$$\alpha\phi + (1 - \alpha)\mathbf{n} \cdot \mathbf{q}_S. \quad (2.22)$$

Još se koriste uvjeti kao ciklički uvjet, periodični uvjet i uvjet simetrične ravnine.

2.5 Modeliranje turbulentnog strujanja

Turbulentno strujanje je najčešći oblik strujanja koji se pojavljuje u prirodi i pojavljuje se pri visokim vrijednostima Reynoldsovog broja. Generalni opis turbulentnog strujanja bio bi kaotično vrtložno gibanje čestica fluida pri čemu sva promjenjiva svojstva osciliraju u prostoru i vremenu. Pošto je ovaj tip strujanja izrazito nestacionaran, veličine se zapisuju kao zbroj srednjih vrijednosti i oscilacija. Zbog nestacionarnosti i posljedičnog miješanja čestica fluida, ovo strujanje ima difuzijski karakter i povećanu disipaciju energije.

Za rješavanje turbulentnog strujanja koriste se numeričke metode rješavanja Navier-Stokesovih jednadžbi. Komplicirano rješavanje ovih jednadžbi zahtijeva vrlo male vremenske korake i diskretizacije te se rješavanje pojednostavljuje Reynoldsovim osrednjavanjem Navier-Stokesovih jednadžbi.

Osrednjavanje se sastoji od rastavljanja fizikalnih veličina na vremenski osrednjenu vrijednost i oscilirajući dio:

$$\mathbf{u} = \bar{\mathbf{u}} + \mathbf{u}', \quad (2.23)$$

$$p = \bar{p} + p'. \quad (2.24)$$

gdje su $\bar{\mathbf{u}}$ i \bar{p} vremenski osrednjene veličine, a p' i u' oscilacije.

Koristeći ovaj zapis, Navier-Stokesove jednačbe zapisujemo kao:

$$\nabla \cdot \bar{\mathbf{u}} = 0, \quad (2.25)$$

$$\frac{\partial \bar{\mathbf{u}}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\mathbf{u}}\bar{\mathbf{u}}) - \nabla \cdot (\nu \nabla \bar{\mathbf{u}}) = -\nabla \bar{p} + \nabla \cdot (\overline{\mathbf{u}'\mathbf{u}'}). \quad (2.26)$$

U jednačbi količine gibanja nelinearni konvektivni član $\overline{\mathbf{u}'\mathbf{u}'}$ predstavlja turbulentna naprezanja i naziva se Reynoldsovim tenzorom naprezanja. To je tenzor od šest nepoznanica i ne može se riješiti. Zbog toga se uvode dopunske jednačbe i koriste se modeli prvog reda korelacije brzina, za koje se tenzor turbulentnih naprezanja modelira prema Boussinesquovoj hipotezi:

$$\overline{\mathbf{u}'\mathbf{u}'} = [\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T] + \frac{2}{3} k \mathbf{I}, \quad (2.27)$$

gdje je ν_t turbulentna viskoznost, \mathbf{I} jedinični vektor, k turbulentna kinetička energija ($k = \frac{1}{2} \overline{\mathbf{u}'\mathbf{u}'}$).

Za modeliranje turbulencija u opsegu ovog rada korišten je $k - \omega$ SST model turbulencije.

2.5.1 $k - \omega$ SST model turbulencije

$k - \omega$ SST model u sebi sadrži dodatne dvije transportne jednačbe. Jednačbe opisuju specifičnu brzinu disipacije turbulencije ω i transport kinetičke energije k . Nastao je kao kombinacija $k - \varepsilon$ i $k - \omega$ modela gdje se strujanje podalje od stijenke modelira $k - \varepsilon$ modelom, a u blizini stijenke se koristi $k - \omega$ model na koji više utječu rubni uvjeti [5].

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\mathbf{u}}k) - \nabla \cdot [(v_{eff}) \nabla k] = \min(G, C_1, \beta * \omega k) - \beta * k\omega, \quad (2.28)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \omega}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\mathbf{u}}\omega) - \omega \nabla \cdot \bar{\mathbf{u}} - \nabla \cdot [(v_{eff}) \nabla \omega] = & \gamma \min \left[S_2, \frac{c_1}{a_1} \beta * \omega \max(a_1 \omega, b_1 F_{23} \sqrt{S_2}) \right] \\ & - \beta \omega^2 + (1 - F_1) CD_{k\omega}. \end{aligned} \quad (2.29)$$

2.6 Metoda pokretnog koordinatnog sustava

Metoda pokretnog koordinatnog sustava ili eng. *Moving Referance Frame*, uvodi pokretni koordinatni sustav. Taj sustav se definira koristeći odabrane kontrolne volumene kojima se dodaju inercijski članovi. Pokretni koordinatni sustav ima dva inačice: *Single Reference Frame* (SRF) i *Multiple Reference Frame* (MRF). U slučaju SRF modela, cijela domena je modelirana kao pokretna zona.

Osnova modela *Multiple Reference Frame* (MRF) proizlazi iz koncepta da se računalna domena može podijeliti na zone, svaka s dodijeljenim različitim vrstama kretanja. Za svaku zonu rješava se strujanje primjenom jednadžbi gibanja modificiranih za pokretni referentni okvir, uz uključivanje pojmova koji opisuju različite vrste rotacija ili translacija [8].

MRF pristup koristi modele za strujanje fluida koristeći i stacionarne i rotirajuće okvire referenci. Rješavanje rotirajućeg dijela domene (rotirajuće zone) provodi se pomoću jednadžbi gibanja u rotirajućem (relativnom) okviru, dok se stacionarni dio (zona) rješava u stacionarnom okviru. Za stacionarne zone jednadžbe gibanja reduciraju se na njihove stacionarne oblike. U oba rotirajuća i stacionarna područja, vektori su definirani u globalnom kartezijanskom koordinatnom sustavu.

Također, jednadžbe se mogu rješavati za brzinu definiranu lokalno u relativnom okviru referenci, no to zahtijeva primjenu uvjeta skoka za brzinu na sučelju između rotora i statora [8].

$$\begin{cases} \nabla \cdot (\mathbf{u}_R \mathbf{u}_I) + \omega \times \mathbf{u}_R = \nabla \cdot (v_{eff} \nabla \mathbf{u}_I) - \nabla \frac{p}{\rho}, \\ \nabla \cdot \mathbf{u}_I = 0. \end{cases} \quad (2.30)$$

Za rješavanje toka fluida u MRF modelu koriste se gore prikazane jednadžbe koje tvore stacionarne nestlačive Navier-Stokesove jednadžbe za rotirajući referentni okvir s apsolutnom konvektiranom brzinom. Za rješavanje toka fluida kroz stacionarne zone koriste se sljedeće jednadžbe [6]:

$$\begin{cases} \nabla \cdot (\mathbf{u}_I \mathbf{u}_I) - \nabla \cdot (v_{eff} \nabla \mathbf{u}_I) = -\nabla \frac{p}{\rho}, \\ \nabla \cdot \mathbf{u}_I = 0. \end{cases} \quad (2.31)$$

MRF model kombinira korištenje stacionarnih i rotirajućih zona. Komunikacija između susjednih zona kontrolnih volumena ostvaruje se putem transformacije u lokalnom referentnom okviru, što omogućava upotrebu varijabli protoka u jednoj zoni za proračun fluksa na granici susjedne zone [8]. Naravno, ovaj model ima svoja ograničenja kao npr. činjenica da je

primjenjiv samo u slučaju stacionarnog strujanja i pretpostavka da su translacijska i rotacijska brzina konstantne kroz vrijeme. Treba naglasiti da nema stvarnog pomaka mreže, tj. nema rotacije. Primjena ovog modela idealna je u slučajevima gdje postoji jedan ili više rotacijskih dijelova. Ova metoda daje dobre rezultate prilikom modeliranja slučajeva bez snažnog utjecaja tranzijentnih pojava.

2.7 Matematički model strujanja za rotirajući koordinatni sustav

Primjena pokretnog referentnog koordinatnog sustava omogućuje transformaciju dinamičkih problema u stacionarne sa koordinatnim sustavom u pokretu. U slučaju konstantnog gibanja (npr. rotacija), jednačbe koje opisuju fluidno strujanje mogu se transformirati, postižući stacionarno strujanje.

Rješavanjem jednačbi strujanja u pokretnom koordinatnom sustavu, akceleracija fluida se proširuje u jednačbi količine gibanja dodatnim članovima. Jednačba količine gibanja može se formulirati koristeći relativnu ili apsolutnu brzinu kao zavisnu varijablu.

U ovom radu koristi se apsolutna formulacija, pri čemu je matematički model strujanja nestlačivog fluida u rotirajućem referentnom koordinatnom sustavu s konstantnom kutnom brzinom [9]:

- Zakon očuvanja količine gibanja

$$\frac{d\vec{v}}{dt} + \nabla \cdot (\vec{\omega}\vec{v}) + \vec{\omega} \times \vec{v} = -\nabla \frac{p}{\rho} + \nabla \cdot (\nu \nabla \vec{v}), \quad (2.32)$$

- Zakon očuvanja mase

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0. \quad (2.33)$$

U jednačbama očuvanja količine gibanja, član $\vec{\omega} \times \vec{v}$ obuhvaća Coriolisovu i centripetalnu akceleraciju, dok je konvektivni član definiran relativnom brzinom $\vec{\omega}$. Kada je zona mirujuća ($\omega = 0$), jednačbe 2.32 i 2.33 pojednostavljaju se, uzimajući oblik koji vrijedi za mirujući koordinatni sustav. Ostatak matematičkog modela čini $k - \omega$ SST model za modeliranje turbulencije.

3 GEOMETRIJA

Geometrija korištena u ovom radu oblikovana je numerički, metodom slobodnog vrtloga kako bi se krajnji rezultat mogao usporediti s analitičkim metodama oblikovanja geometrije, specifično rotorskih i statorskih lopatica.

3.1 Oblikovanje rotora i statora

Pri oblikovanju aeroprofila za konstrukciju rotorske lopatice, za numeričku metodu potrebno je trodimenzionalno strujanje razviti u dvodimenzionalno, kako bi se dobila ravna rešetka. Dobiveno dvodimenzionalno strujanje predstavlja stvarni slučaj u tri dimenzije sve dok je zadovoljen uvjet radijalne ravnoteže. Oblikovanje lopatica se radilo sukladno s metodom slobodnog vrtloga (eng. *Free Vortex*), koja iskazuje da je rad obavljen na fluidu konstantan duž cijelog radijusa. Umnožak $v_u r = konst.$ vrijedi za protok i ispred i iza rotora.

Lopaticе rotora su projektirane za parametre zadane u tekstu diplomskog zadatka:

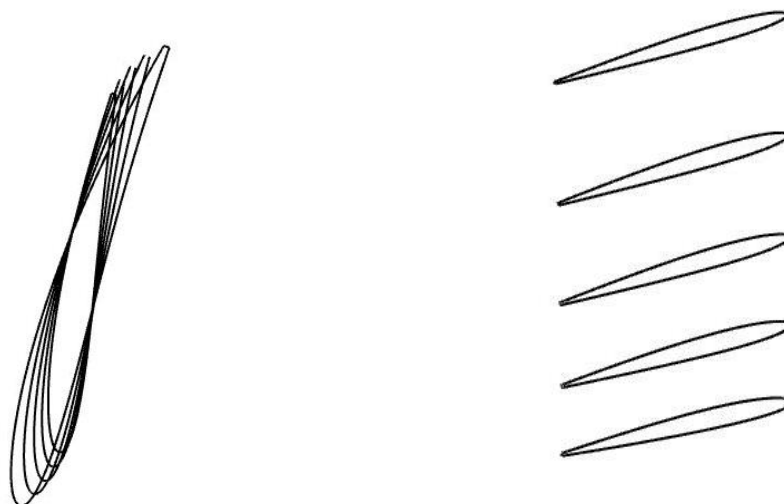
- Vanjski promjer rotora $d_v = 1242$ mm ;
- Protok $Q_n = 23.8$ m³/s ;
- Prirast zaustavnog tlaka $\Delta p_{stat} = 895$ Pa ;

Za oblikovanje rotorskih i statorskih lopatica korištena je numerička metoda koja je detaljnije objašnjene u diplomskom radu Anje Horvat [10], te je prilagođena za rad s ventilatorima.

Pri oblikovanju lopatice koristio se kod napisan u programskom jeziku *Python*, koji koristi bazu podataka četveroznakastih NACA aeroprofila kako bi se formulirao novi, nestandardni profil za specifične potrebe ovog rada. Autor koda je profesor Željko Tuković. U nomenklaturi NACA aeroprofila prva znamenka opisuje maksimalni odmak srednje linije profila od tetive, druga znamenka predstavlja udaljenost maksimalnog odmaka srednje linije od prednjeg ruba profila te posljednje dvije znamenke označavaju maksimalnu debljinu profila kao postotak tetive.

Ubacivanjem parametara zadanih u tekstu zadatka u *Python* kod, dobiva se aeroprofil od kojeg se može dalje izraditi lopatica.

Samo oblikovanje lopatice odrađeno je koristeći CAD program *Rhino7*. Uzeti su dobiveni aeroprofil presjeka na 5 različitih udaljenosti od osi rotacije i povezani u jedinstvenu lopaticu koristeći funkciju *Loft*.



Slika 3.1 Pogled na aeroprofile s gornje strane (lijevo) i presjeci lopatice (desno)

Nakon konstruiranja jedne, bilo je potrebno odrediti broj lopatica. Ako je duljina tetive profila lopatice fiksna, optimalan broj lopatica u rotoru ventilatora određuje se tako da se postigne željeni zakret relativnog toka. Preveliki broj lopatica uzrokuje povećane gubitke i višu cijenu ventilatora, dok premali broj može dovesti do odvajanja toka. Optimalni broj lopatica određuje se primjenom Zweifelovog koeficijenta tangencijalne sile, provodeći ga u korijenu lopatice gdje je potreban najveći zakret toka zbog uvjeta slobodnog vrtloga [10].

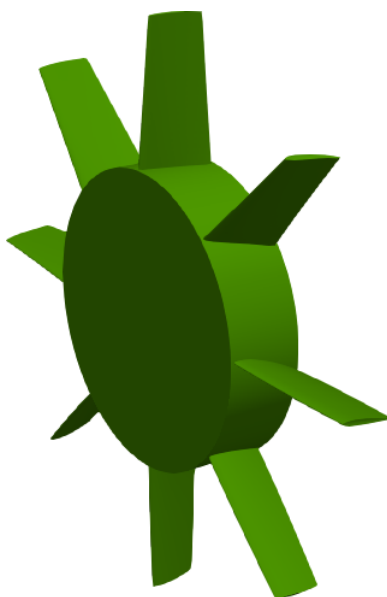
U tablicama ispod, navedeni su geometrijski parametri rotora i statora:

Tablica 1. Geometrijski parametri rotora

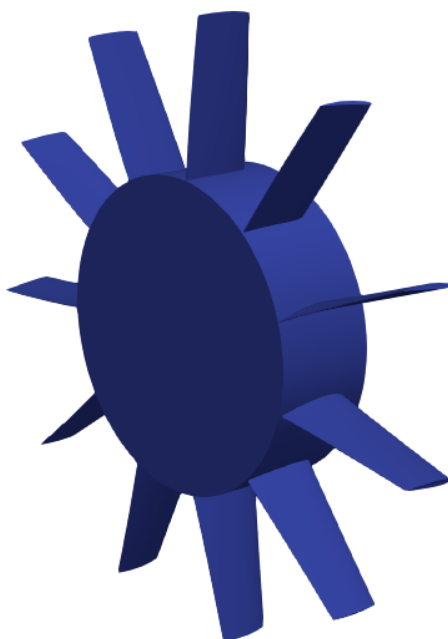
Polumjer vrha lopatica rotora,	621 mm
Polumjer korijena lopatica rotora,	315 mm
Širina glavine rotora	160 mm
Broj lopatica	8

Tablica 2. Geometrijski parametri statora

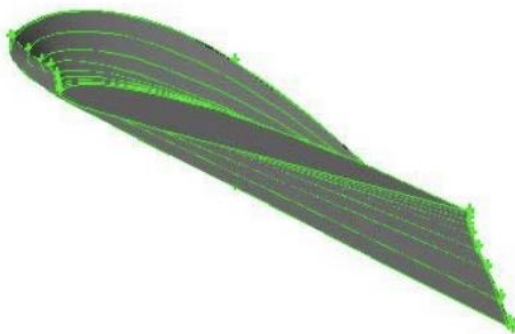
Polumjer vrha lopatica statora	621 mm
Polumjer korijena lopatica statora	315 mm
Širina glavine statora	160 mm
Broj lopatica	11

**Slika 3.2 Rotor**

Postupak oblikovanja statorskih lopatica je u potpunosti identičan postupku oblikovanja rotorskih lopatica. Dobiveni aeroprofilu su identični rotorskim tako da su rotorske i statorske lopatice zrcalne slike jedne drugih.

**Slika 3.3 Stator**

Jedina izražena razlika u konstrukciji rotora i statora jest ta da stator ima 11 lopatica. To je odabrana vrijednost prema iskustvenim podacima koja nalaže da je za ispravljanje strujanja pogodniji veći broj lopatica. Još jedna stavka na koju je trebalo obratiti pažnju jest ta, da broj lopatica statora ne smije biti višekratnik broja 8 (broj lopatica rotora) - kako bi se izbjegla pojava vibracija i rezonantnih efekata.



Slika 3.4 Lopatica dobivena analitičkim proračunom [11]

Dio zadatka ovog rada je i usporedba numeričkim putem konstruirane lopatice s lopaticom dobivenom analitičkom metodom. Na slici 3.4 prikazana je lopatica konstruirana analitičkim pristupom u sklopu drugog diplomskog rada [11] te je projektirana za iste parametre kao u ovom radu. Usporedbom aeroprofila na presjecima lopatice i općenitog izgleda dviju lopatica očito je da su izvedbe slične, s manjim razlikama u obliku aeroprofila. Ovakav ishod je očekivan, s obzirom na to da se pri analitičkom pristupu biraju standardni aeroprofil prema izračunatim parametrima (u slučaju rada [12], Gottingen aeroprofil) za različite radijuse lopatice, dok numerički pristup koristi bazu standardnih profila kako bi dobio novi, nestandardni profil specifično konstruiran za zadane parametre.

3.2 Prostorna domena

Analiza strujanja je provedena za tri izvedbe:

- bez usmjeravajućih statorskih lopatica,
- sa usmjeravajućim statorskim lopaticama ispred rotora,
- sa usmjeravajućim statorskim lopaticama iza rotora.

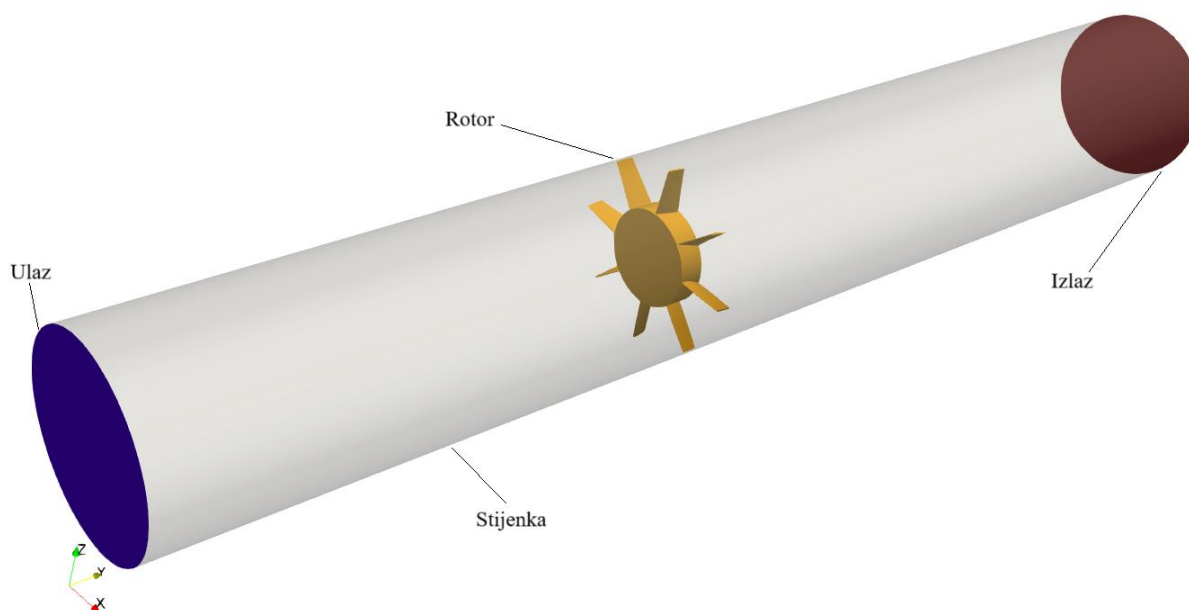
Geometrija rotora, statora i lopatica je definirana u prethodnom poglavlju te se u ovom poglavlju definira cijela prostorna domena.

U tablici su prikazane dimenzije geometrije:

Tablica 3. Geometrijski parametri prostorne domene

Duljina, L	8700 mm
Polumjer stijenke, R	315 mm

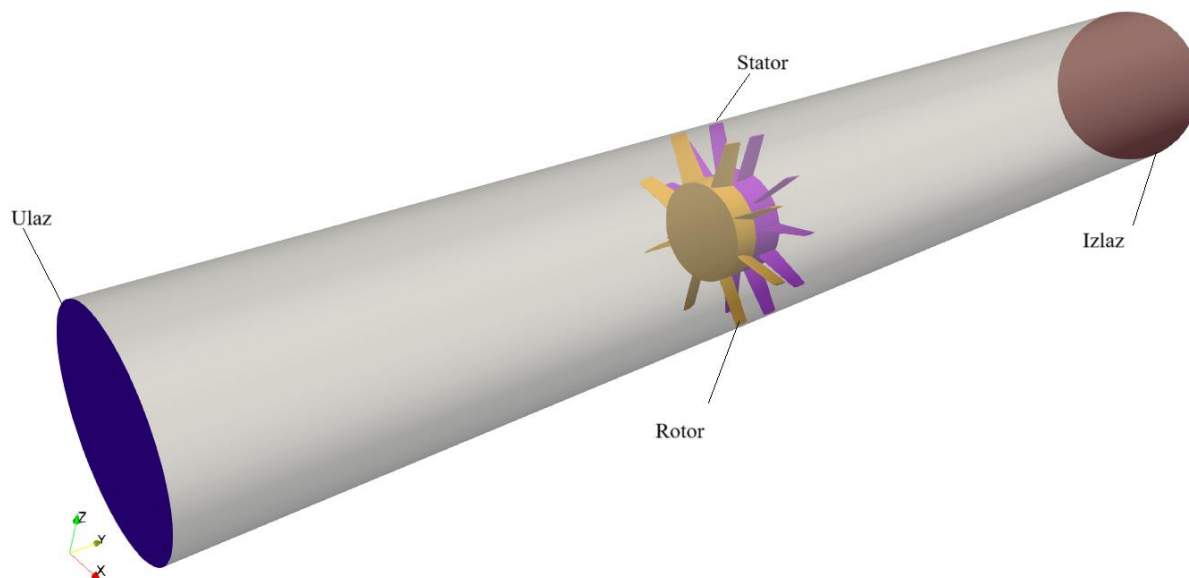
Rubna ploha računalne domene aksijalnog ventilatora u cijevi sastoji se od zidova (nepropusnih stijenki) i rubnih ploha kroz koje fluid ulazi i izlazi iz domene. Zidovi se dijele na rotirajuće i mirujuće. Potrebno je naglasiti da se sami zidovi ne rotiraju, već je na njima zadana rotacija, tj. obodna brzina. Rotirajuće zidove čine rotorske lopatice, a mirujuće zidove čini stijenka, rotorska i statorska glavina te statorske lopatice.



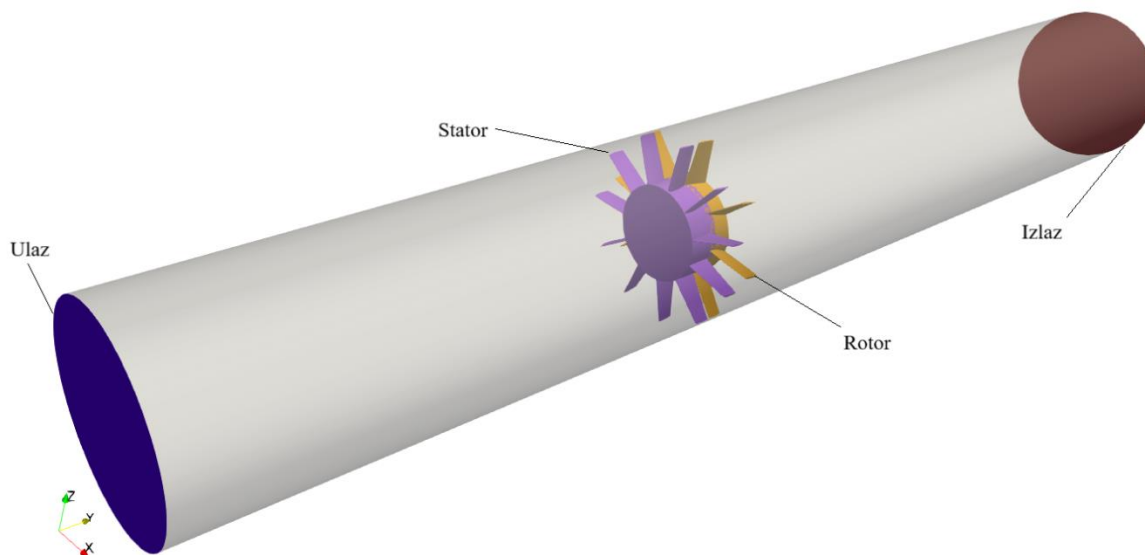
Slika 3.5 Prostorna domena izvedbe sa rotorom

Slika 3.5 prikazuje prostornu domenu. Tamno plavom bojom označena je ulazna ploha kroz koju fluid ulazi u sustav, dok je crvenom bojom označena izlazna ploha. Bijelom bojom označena je nepropusna stijenka koja ima ulogu cijevi u kojoj se nalazi rotor koji je označen narančastom bojom. Na slikama 3.7 i 3.6 prikazane su izvedbe sa statorom označenim ljubičastom bojom. Slike 3.7 i 3.6 su identične samo je zamijenjena pozicija rotora i statora.

Udaljenost između rotora i statora u oba slučaja iznosi 50 mm. Udaljenost je odabrana prema literaturi koja navodi da je to udaljenost koja daje najpovoljnije rezultate i više učinkovitosti ventilatora [12].



Slika 3.6 Prostorna domena izvedbe stator nizvodno



Slika 3.7 Prostorna domena izvedbe stator uzvodno

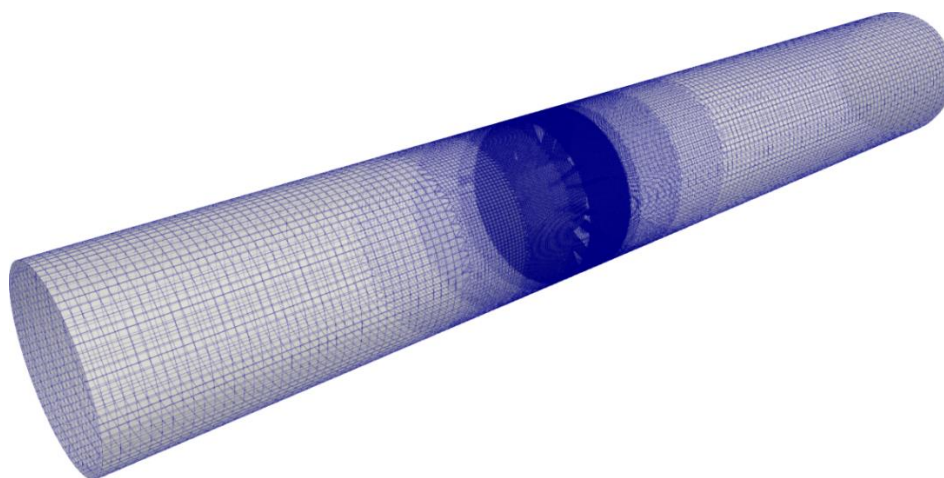
4 DISKRETIZACIJA PROSTORNE DOMENE

Diskretizacija prostorne domene provedena je koristeći računalni program *cfMesh* [13]. Dobivene su računalne domene s dominantnim heksaedarskim kontrolnim volumenima. U tablici su prikazani parametri mreža svake izvedbe zasebno.

Tablica 4. Parametri mreže

	Veličina mreže (broj KV)	Heksaedri	Prizme	Piramide	Tetraedri	Poliedri
Rotor	12,084,051	11,776,594	7,426	21,813	21,522	256,696
Stator uzvodno	12,504,553	12,062,524	18,238	55,559	5,840	0
Stator nizvodno	12,360,510	11,919,186	0	58,483	59,134	305,392

Slika 4.1 prikazuje izgled računalne domene za analizu strujanja u numeričkim simulacijama izvedbe samo s rotorom ventilatora. Vidljive su četiri zone različite gustoće mreže. Najgušća zona nalazi se oko samog rotora, gdje je potreban najveći broj KV kako bi se što točnije prikazalo strujanje u tom području. Sljedeće dvije šire zone imaju postupno manju gustoću KV koja omogućuje gladi prijelaz iz najmanjih KV najuže zone, u najveće KV posljednje zone.



Slika 4.1 Diskretizacija prostorne domene

4.1 Rubni uvjeti

Za nominalni protok zadani su sljedeći rubni uvjeti:

Tablica 5. Pregled rubnih uvjeta

Rubni uvjeti					
Naziv	U [m/s]	p [Pa]	k [m ² /s ²]	ω [s ⁻¹]	nut [m ² /s]
Ulaz	fixedValue; uniform (0 19.10987 0);	zeroGradient;	turbulentIntensityKineticEnergyInlet; uniform 0.493;	nuRatioOmega; uniform 493;	zeroGradient;
Izlaz	inletOutlet; uniform (0 19.10987 0); inletValue uniform (0 0 0);	fixedValue; uniform 0 ;	inletOutlet; inletValue uniform 0.493; uniform 0.493;	inletOutlet; inletValue uniform 493; uniform 493;	zeroGradient;
Zidovi*	fixedValue; uniform (0 0 0);	zeroGradient;	kqRWallFunction; uniform 0.493;	omegaWallFunction; refValue 0; uniform 493;	nutWallFunction; uniform 0;

Zidovi*- stijenka, statorsche i rotorske lopatice, statorska i rotorska glavina.

Iznos brzine U_n za nominalni protok dobije se:

$$A = \frac{d_v^2 \pi}{4}, \quad (4.1)$$

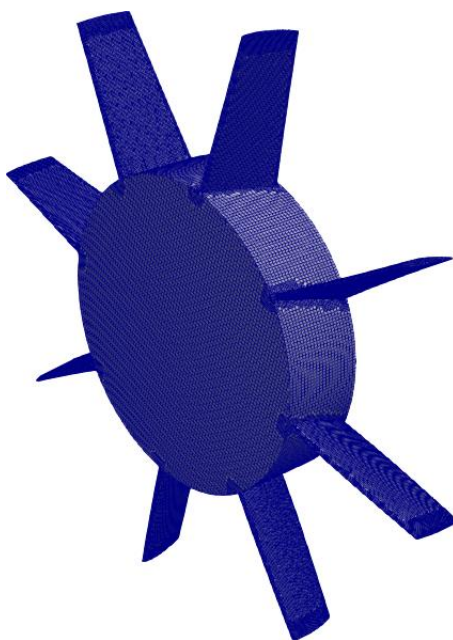
$$U_n = \frac{Q_n}{A}, \quad (4.2)$$

gdje površina iznosi $A = 1.24543 \text{ m}^2$.

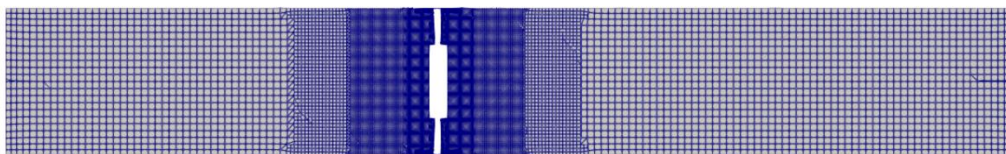
Rubni uvjeti identični su za sve protoke, jedino što se mijenja jest uvjet brzine U koji se dobije dijeljenjem novog protoka sa površinom. Brzina strujanja u aksijalnom smjeru za druge protoke:

- 10% Q_n ; $U = 1.9109 \text{ m/s}$
- 25% Q_n ; $U = 4.7774 \text{ m/s}$
- 50% Q_n ; $U = 9.5549 \text{ m/s}$
- 75% Q_n ; $U = 14.3324 \text{ m/s}$
- 110% Q_n ; $U = 21.021 \text{ m/s}$

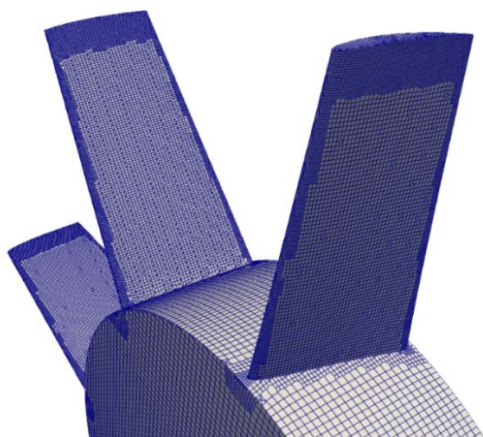
Na slici 4.2 vidi se diskretizacija prostorne domene kod rotora, a na slici 4.4 vidi se detalj te iste diskretizacije. Na slici 4.4 bolje se vidi razlika u gustoći mreže na stranama lopatica i glavine rotora u usporedbi s gustoćom mreže na rubovima, vrhovima i korijenu lopatice. Na slici 4.3 vidi se presjek diskretizacije prostorne domene po duljini domene. Jasno se vide četiri zone različite gustoće mreže kako bi se osigurao što glađi prijelaz iz manjih KV u veće KV.



Slika 4.2 Diskretizacija prostorne domene kod rotora

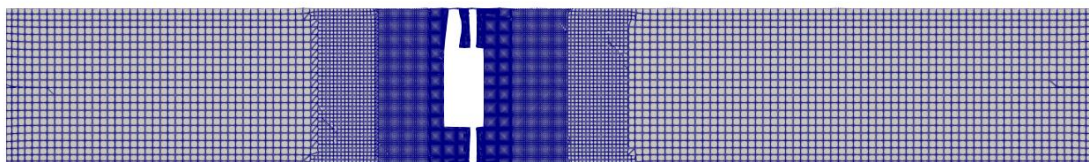


Slika 4.3 Presjek diskretizacije prostorne domene

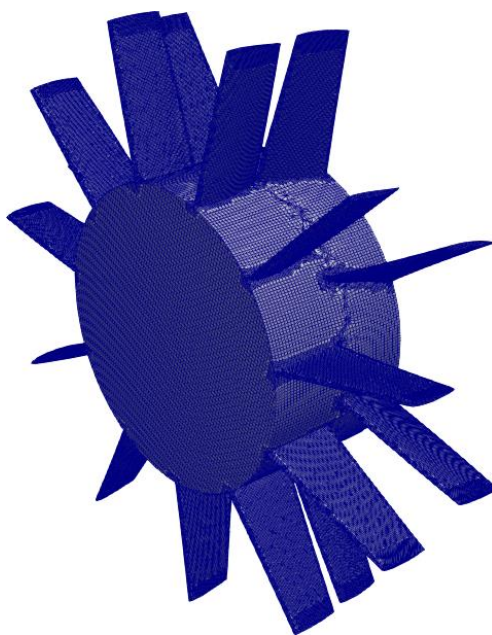


Slika 4.4 Detalj diskretizacije prostorne domene kod rotora

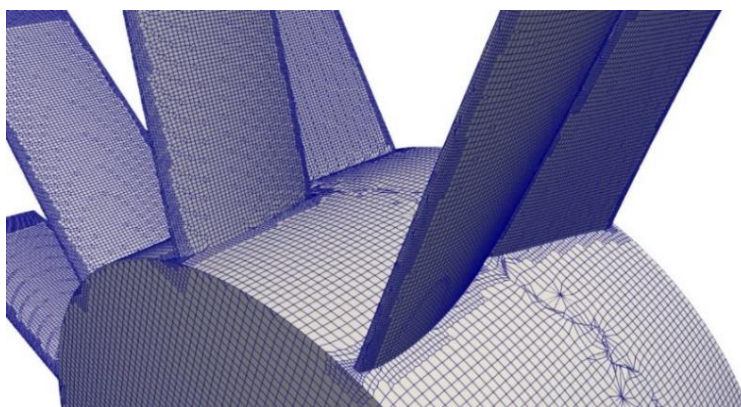
Rezultat diskretizacije prostorne domene za izvedbu sa statorom prikazani su na slici 4.6. Slika 4.7 prikazuje detalj diskretizacije prostorne domene kod statora i rotora na kojoj se vidi razlika u gustoći mreže na rubovima, vrhovima i korijenima statorskih i rotorskih lopatica u usporedbi s gustoćom mreže na glavinama statora i rotora i strana lopatica. Zone veće gustoće na rubovima i vrhovima lopatica su potrebne kako bi rezultati strujanja bili što vjerniji stvarnom strujanju. Slika 4.5 prikazuje presjek diskretizacije prostorne domene izvedbe sa statorom ispred rotora te se na njoj isto vide



Slika 4.5 Presjek diskretizacije prostorne domene izvedbe stator uzvodno

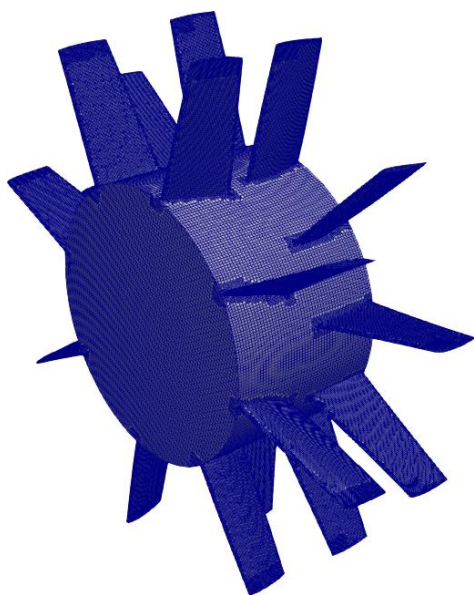


Slika 4.6 Diskretizacija prostorne domene kod statora i rotora

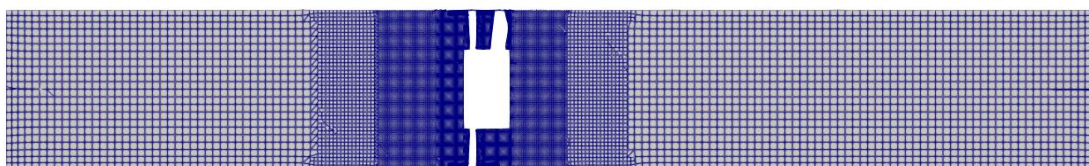


Slika 4.7 Detalj diskretizacije prostorne domene kod statora i rotora

Diskretizacija prostorne domene kod rotora i statora prikazana je na slici 4.8, a na slici 4.9 prikazan je presjek diskretizacije prostorne domene po X osi. Mreža za ovu izvedbu vrlo je slična izvedbi sa statorom ispred rotora, jedina razlika je u poziciji rotora i statora.



Slika 4.8 Diskretizacija prostorne domene – rotor i stator



Slika 4.9 Presjek diskretizacije prostorne domene izvedbe stator nizvodno

5 REZULTATI

Osim same konstrukcije, drugi dio zadatka ovog diplomskog rada bio je odrediti karakteristiku aksijalnog ventilatora za zadane parametre. Također, bilo je potrebno usporediti učinkovitosti i slike strujanja izvedbe bez statora sa izvedbama statora uzvodno i nizvodno od rotora za slučaj nominalnog protoka. Za dobivanje karakteristike provedeno je šest simulacija.

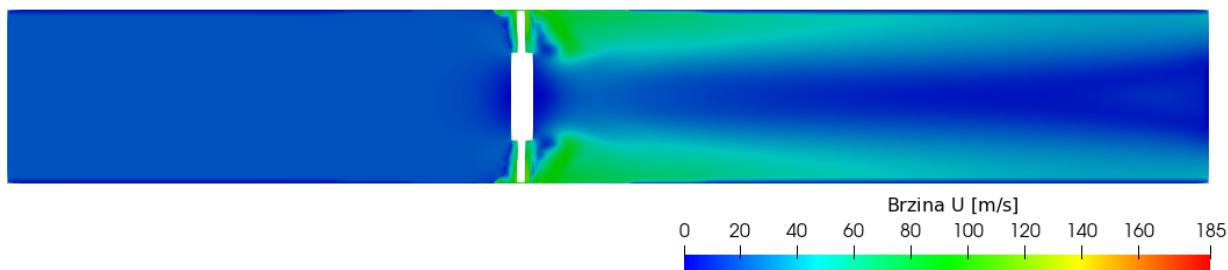
5.1 Simulacija strujanja u aksijalnom ventilatoru bez usmjeravajućih statorskih lopatica

5.1.1 Nominalni protok, Q_n

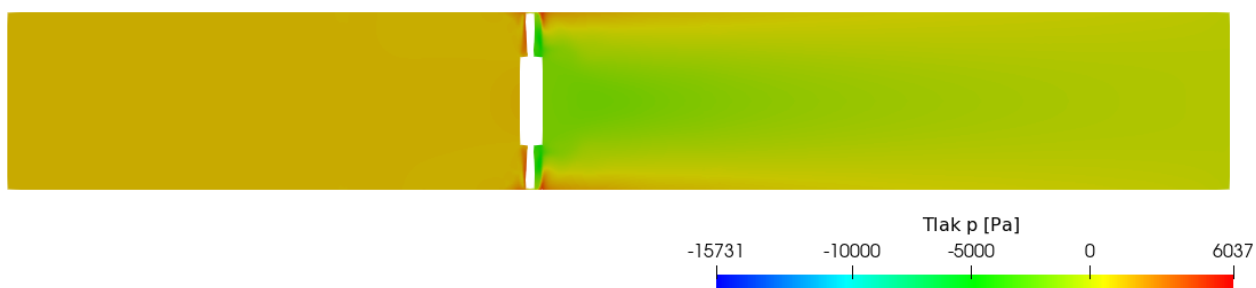
Prvi slučaj ispitivanog strujanja je bio za izvedbu ventilatora bez usmjeravajućih statorskih lopatica s narinutim protokom. Brzina vrtnje rotora je zadana u skladu s vrijednostima za katalog aksijalnog ventilatora [1].

Zadani parametri za prvi slučaj:

- $Q_n = 23.8 \text{ m}^3/\text{s}$
- $n = 1780 \text{ o/min}$

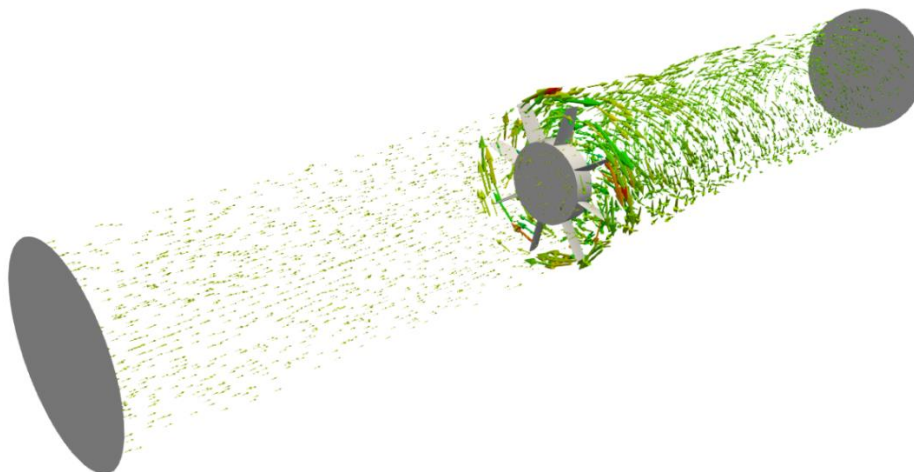


Slika 5.1 Polje brzine za nominalni protok



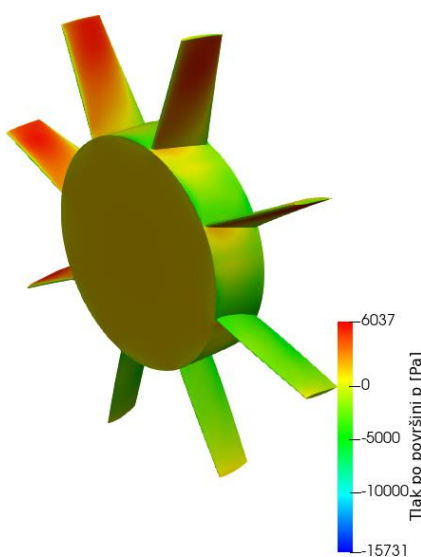
Slika 5.2 Polje tlaka za nominalni protok

Glavni fokus je na rezultatima koji se odnose na brzinu i tlak, pošto se njima određuje karakteristika ventilatora i učinkovitost. Simulacije su provedene pod pretpostavkom nestlačivog strujanja. Posljedično, na slici 5.2 se vidi kako je statički tlak manji iza rotora. Pošto je strujanje nestlačivo, a fluidu prolaskom kroz ventilator raste brzina (dovodi se kinetička energija), tlak je manji (Bernoullijeva jednačba). Slika 5.3 prikazuje vektore brzine za nominalni protok. Uz rotor, na slici su vidljive i ulazna i izlazna ploha.



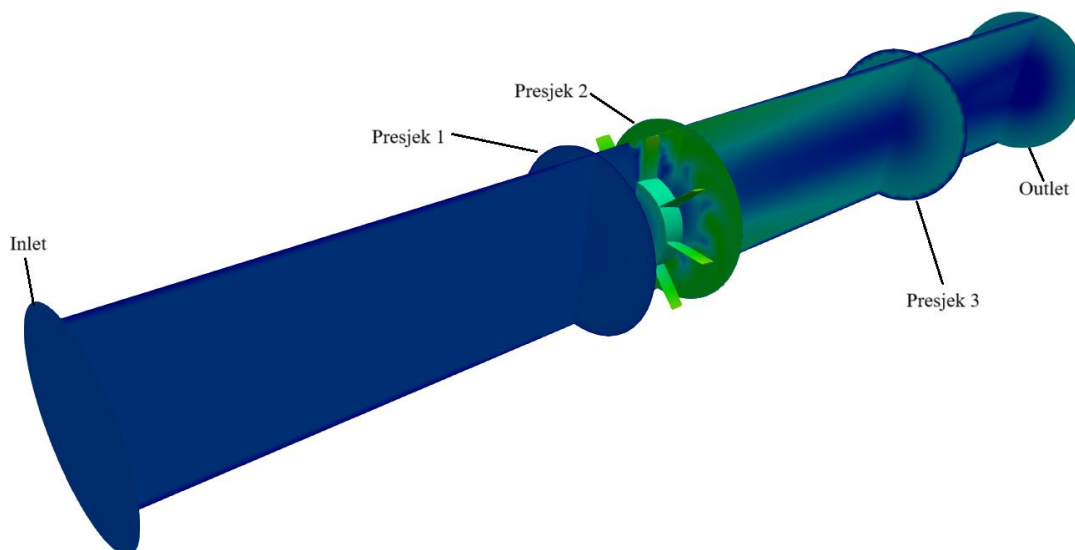
Slika 5.3 Vektori brzine za nominalni protok

Slika 5.4 prikazuje raspodjelu tlaka po cijeloj površini rotora. Pravilna raspodjela tlaka ključna je za postizanje maksimalne učinkovitosti aksijalnog ventilatora, smanjenje potrošnje energije i osiguravanje stabilnog rada u različitim uvjetima.



Slika 5.4 Tlak po površini rotora za nominalni protok

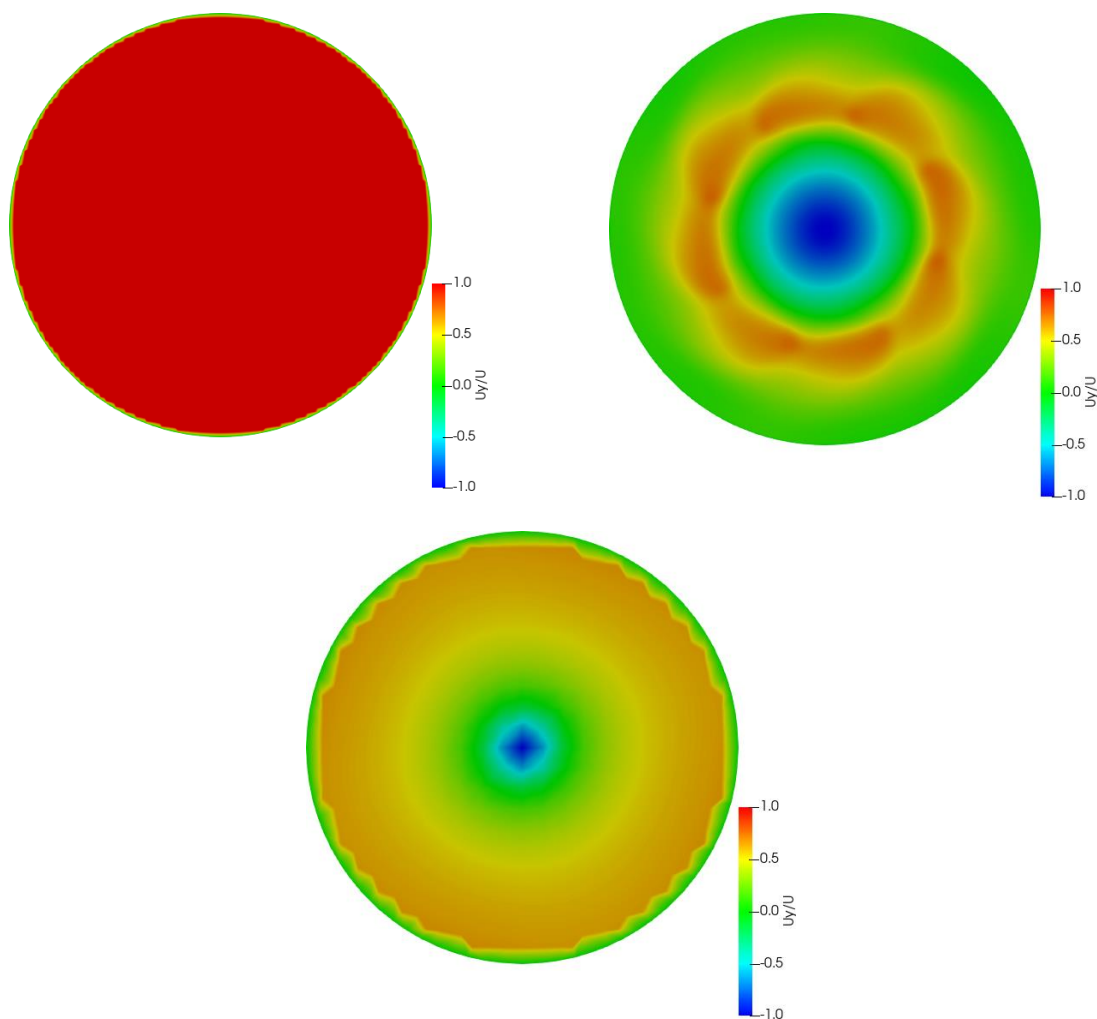
Kako bi se dobio malo bliži pogled u rezultirajuće strujanje i kako bi se mogli uspoređivati te što bolje diferencirati rezultati za različite slučajeve protoka, promatrani su i rezultati na tri presjeka sa normalom u smjeru osi Y. Ishodište koordinatnog sustava se nalazi u središtu rotora. S obzirom na ishodište, presjek 1 se nalazi na -0.5 m po Y osi, presjek 2 na 0.3 m, a presjek 3 na 3 m udaljenosti od ishodišta.



Slika 5.5 Presjeci domene

Presjek 1 se nalazi ispred rotora gdje je strujanje još uvijek uniformno, presjek 2 neposredno iza rotora gdje se vidi najveći utjecaj rotora na strujanje. Presjek 3 se nalazi na većoj udaljenosti iza rotora, gdje strujanje opet postaje uniformnije.

Promatrana veličina na presjecima jest aksijalnost strujanja. Ukupna apsolutna brzina fluida U je vektor koji se sastoji od X, Y i Z komponente te se preko veličinskog udjela svake od tih komponenti može prikazati aksijalnost strujanja. Na ulazu i ispred rotora X i Z komponente vektora U iznose 0 tako da je strujanje u domeni potpuno aksijalno, osim na stijenki gdje je postavljeno da je brzina $U = 0$ zbog lijepljenja fluida na stijenku. Slika 5.6 prikazuje rezultate udjela aksijalne komponente brzine strujanja za nominalni protok.



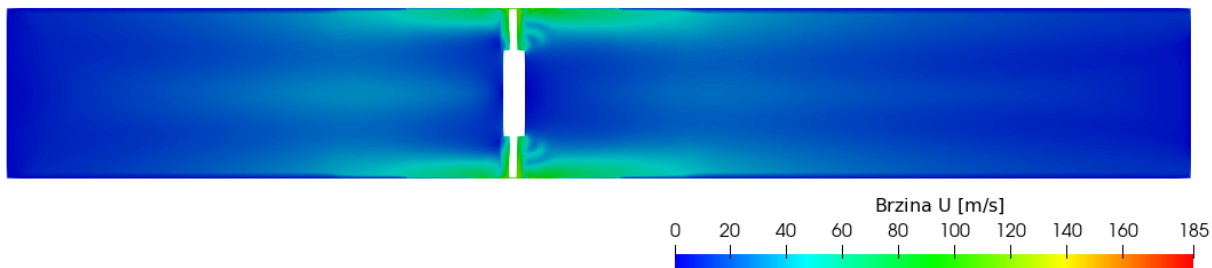
Slika 5.6 Udio aksijalne komponente brzine strujanja za nominalni protok na presjeku 1 (gore lijevo), 2 (gore desno) i 3 (dolje)

Presjek 1 pokazuje da omjer aksijalne komponente vektora brzine U i duljina vektora brzine U većinski iznosi 1 što potvrđuje činjenicu aksijalnog strujanja fluida prije rotora. Na presjeku 2 vidi se utjecaj rotora na strujanje te je vidljivo da uslijed rada rotora dolazi do recirkulacije fluida neposredno iza glavine rotora. Na presjeku 3 slika strujanja prikazuje šire područje uniformnijeg i udio aksijalne komponente strujanja je veći u odnosu na sliku strujanja na presjeku 2.

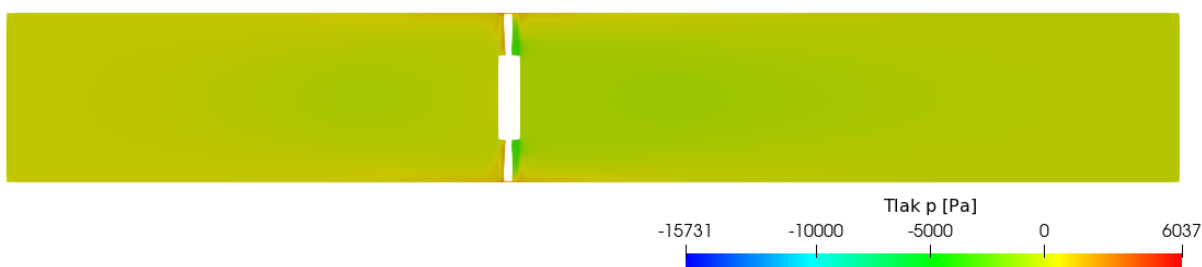
U daljnjim poglavljima su prikazani rezultati odabranih protoka 10% Q_n , 50% Q_n i 110% Q_n .

5.1.2 10% Q_n

U slučaju 10% Q_n , aksijalna brzina na ulazu iznosi $U = 1.9109$ m/s, a protok $Q = 2.38$ m³/s. Na slikama 5.7 i 5.8 prikazana su izračunata polja brzine i tlaka. Zbog premalog narinutog protoka ventilator nema visoku učinkovitost jer ne odrađuje dobro funkciju podizanja energije zraku.



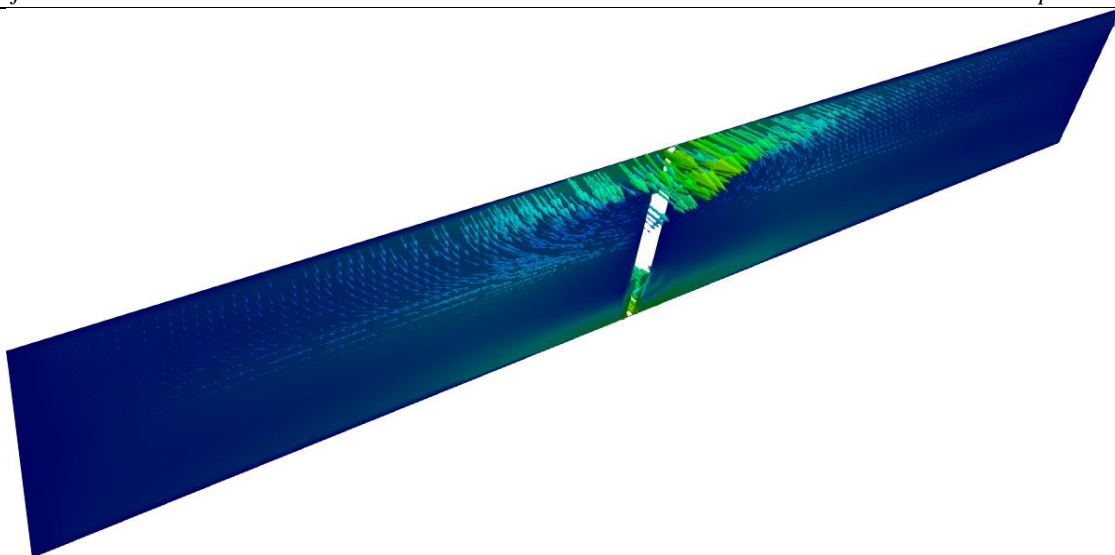
Slika 5.7 Polje brzine za 10% Q_n



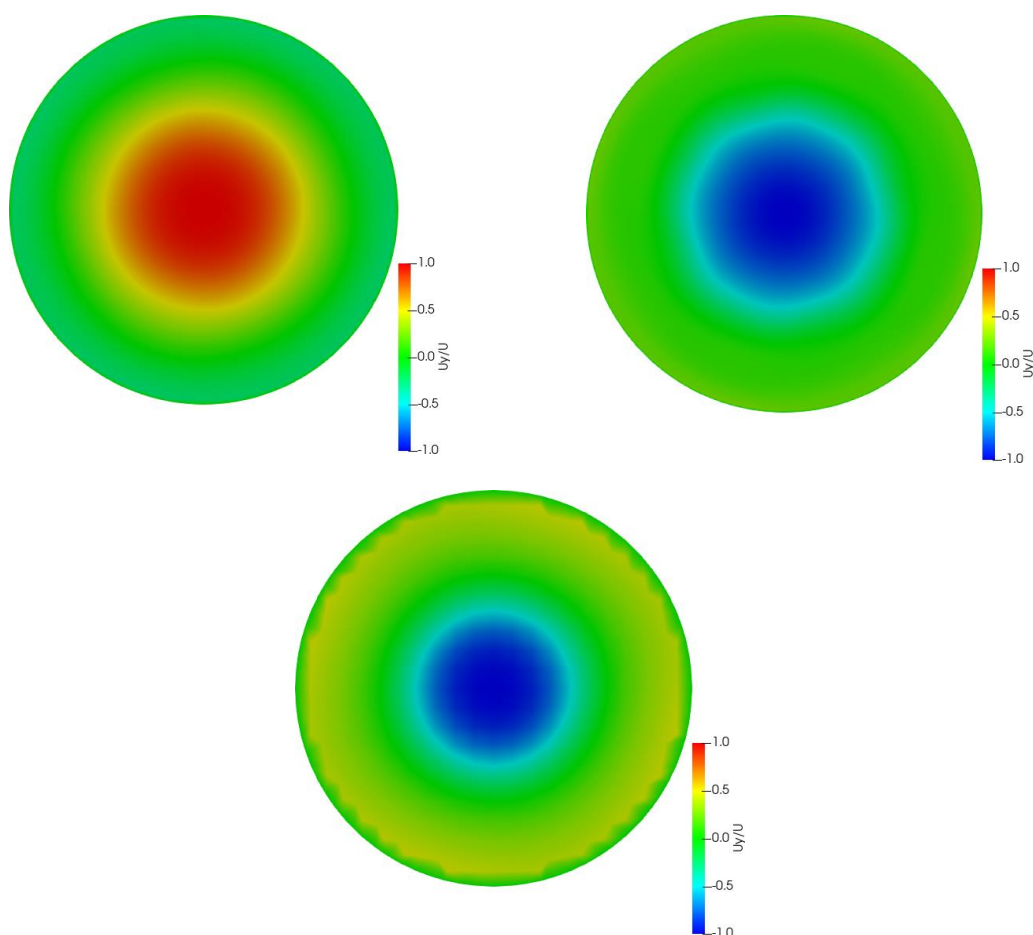
Slika 5.8 Polje tlaka za 10% Q_n

Protok nije dovoljno velik da bi se ostvarila neka zamjetna promjena u tlaku, stoga slika 5.8 prikazuje podosta konstantno polje tlaka.

Slika strujanja bolje se vidi na slici 5.9 gdje su prikazani vektori brzine na presjeku domene. Na donjoj slici može se uočiti da za uvjete ovog slučaja strujanje ispred rotora više nije striktno aksijalno i da vektori brzine ispred rotora imaju značajnu tangencijalnu komponentu koja zakreće strujanje od aksijalnog smjera.

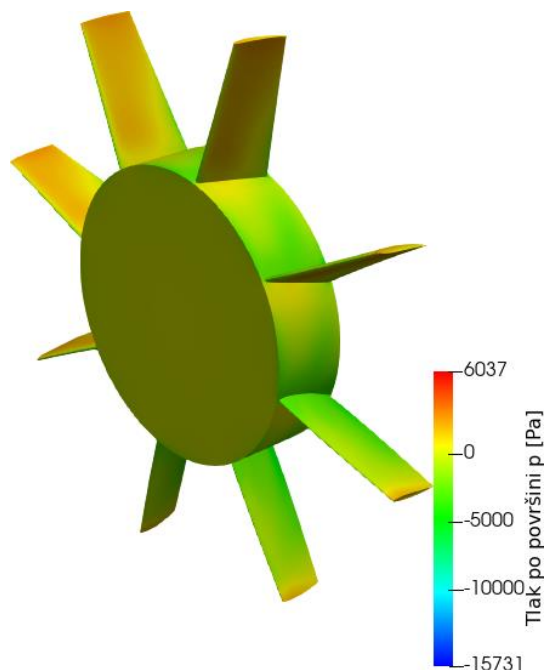


Slika 5.9 Vektori brzine za 10% Q_n



Slika 5.10 Udio aksijalne komponente brzine strujanja za 10% Q_n na presjeku 1 (gore lijevo), 2 (gore desno) i 3 (dolje)

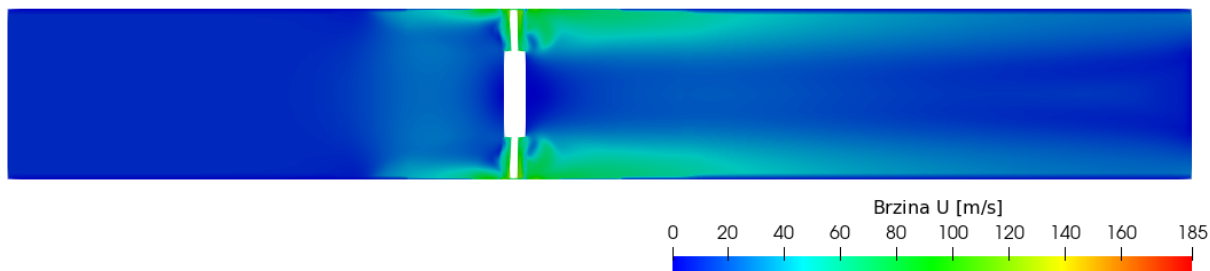
Slika 5.10 pokazuje da strujanje na odabranim presjecima ima izraženu veliku tangencijalnu komponentu te da je iznos aksijalne komponente na velikom dijelu presjeka jednak 0. Iznos aksijalne komponente diktira samu translaciju zraka tako da na mjestima gdje je ona jednaka 0, zrak ima čisto rotacijsko kretanje. Na slici 5.11 vidi se znatno manji tlak po površini rotora u usporedbi sa tlakom na površini rotora u slučaju s nominalnim protokom.



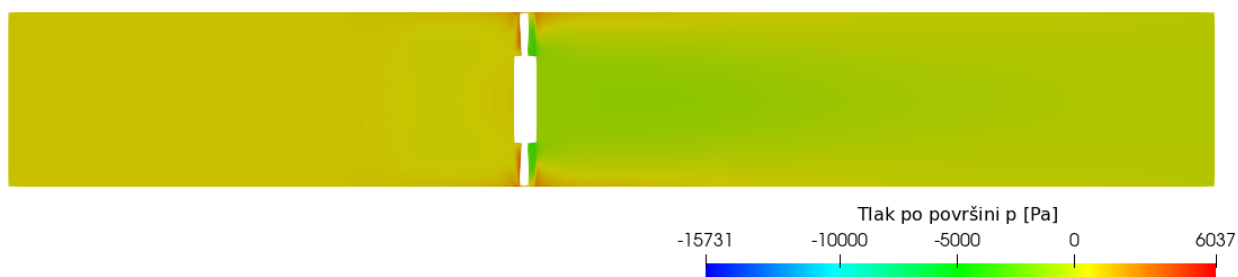
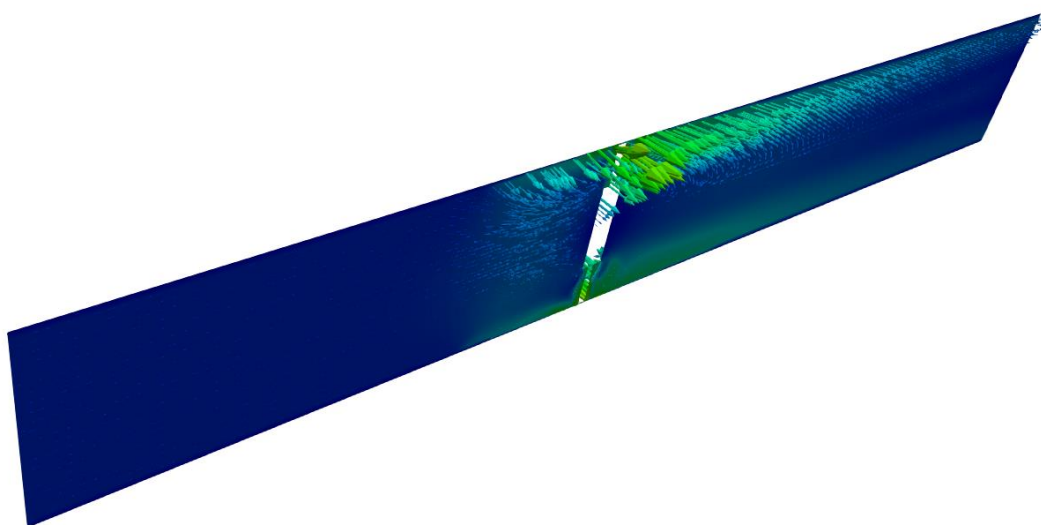
Slika 5.11 Tlak na površini rotora za 10% Q_n

5.1.3 50% Q_n

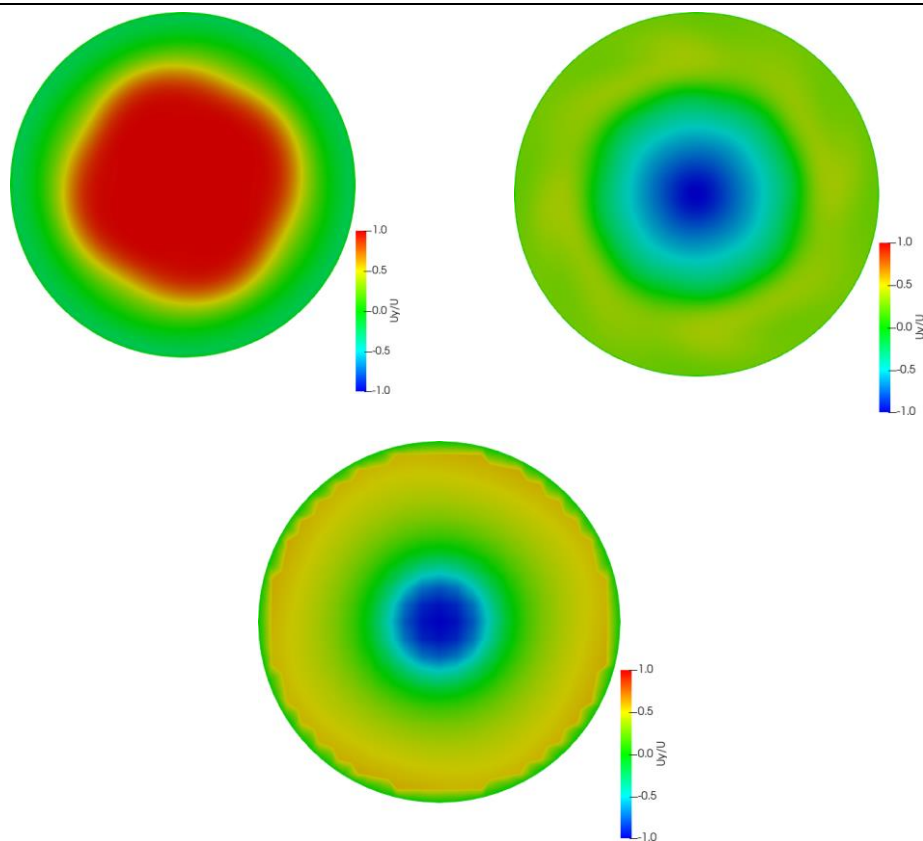
Za ovaj slučaj protok iznosi $Q = 11.9 \text{ m}^3/\text{s}$, a brzina strujanja na ulazu je $U = 9.5549 \text{ m/s}$.



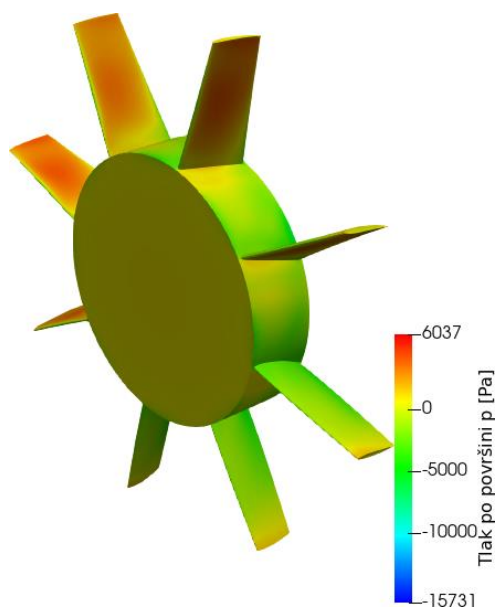
Slika 5.12 Polje brzine za 50% Q_n

Slika 5.13 Polje tlaka za 50% Q_n Slika 5.14 Vektori brzine za 50% Q_n

U usporedbi sa prethodnim slučajem, udio aksijalne komponente brzine strujanja je malo veći jer slika 5.15 na presjeku 3 prikazuje malo uniformnije strujanje i manji iznos tangencijalne komponente. Isto tako, presjek 1 prikazuje kako je utjecaj lijepljenja fluida na stijenku puno manji od prethodnog slučaja. Prema profilu strujanja može se zaključiti da u slučaju ovako narinutih uvjeta, aksijalni ventilator ne postiže visoku učinkovitost.



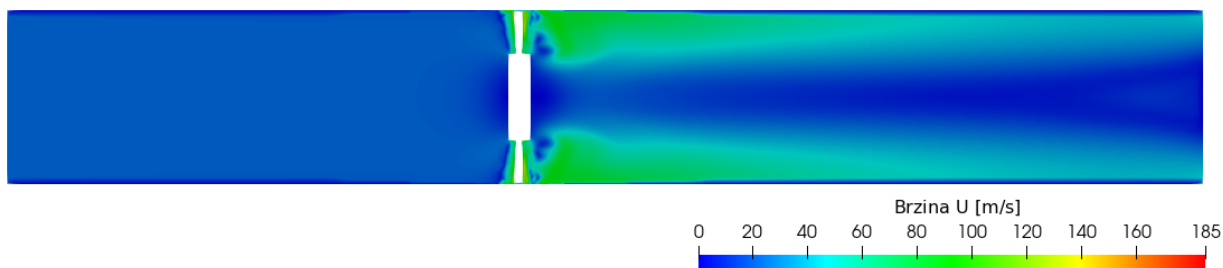
Slika 5.15 Udio aksijalne komponente brzine strujanja za 50% Q_n na presjeku 1 (gore lijevo), 2 (gore desno) i 3 (dolje)



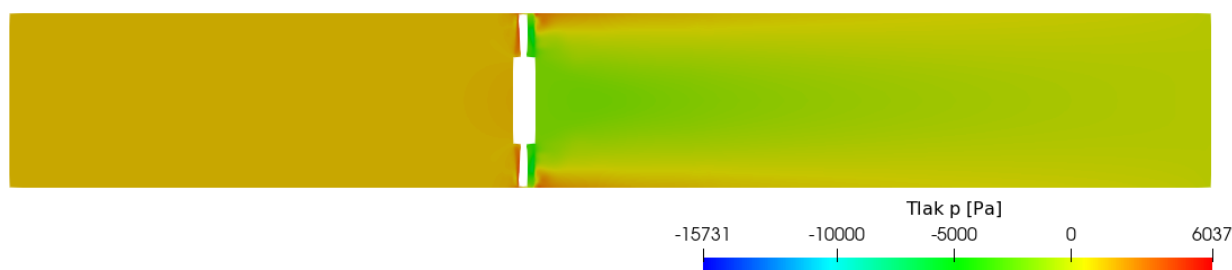
Slika 5.16 Tlak na površini rotora za 50% Q_n

5.1.4 110% Q_n

Protok iznosi $Q = 26.18 \text{ m}^3/\text{s}$, a brzina strujanja na ulazu je $U = 21.021 \text{ m/s}$. Za ovaj slučaj protok je veći od nominalnog tako da je utjecaj rotora na strujanje veći od slučaja sa nominalnim protokom te je strujanje neujednačeno na puno većem području iza rotora.

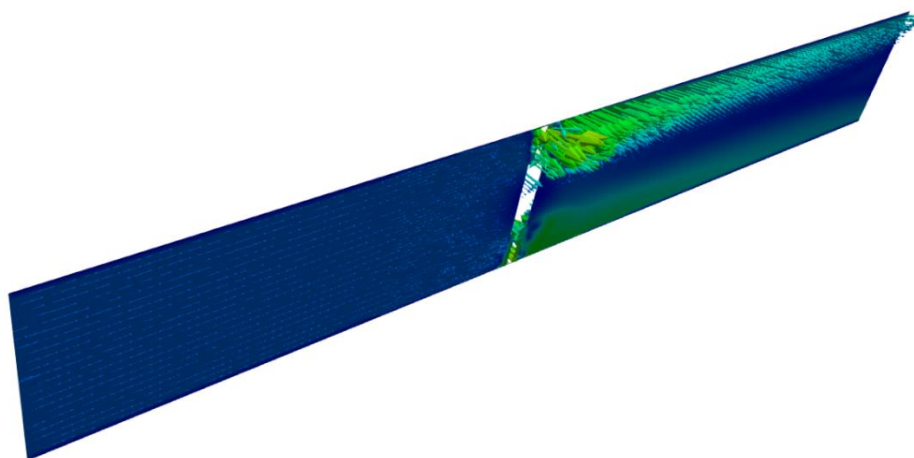


Slika 5.17 Polje brzine za 110% Q_n

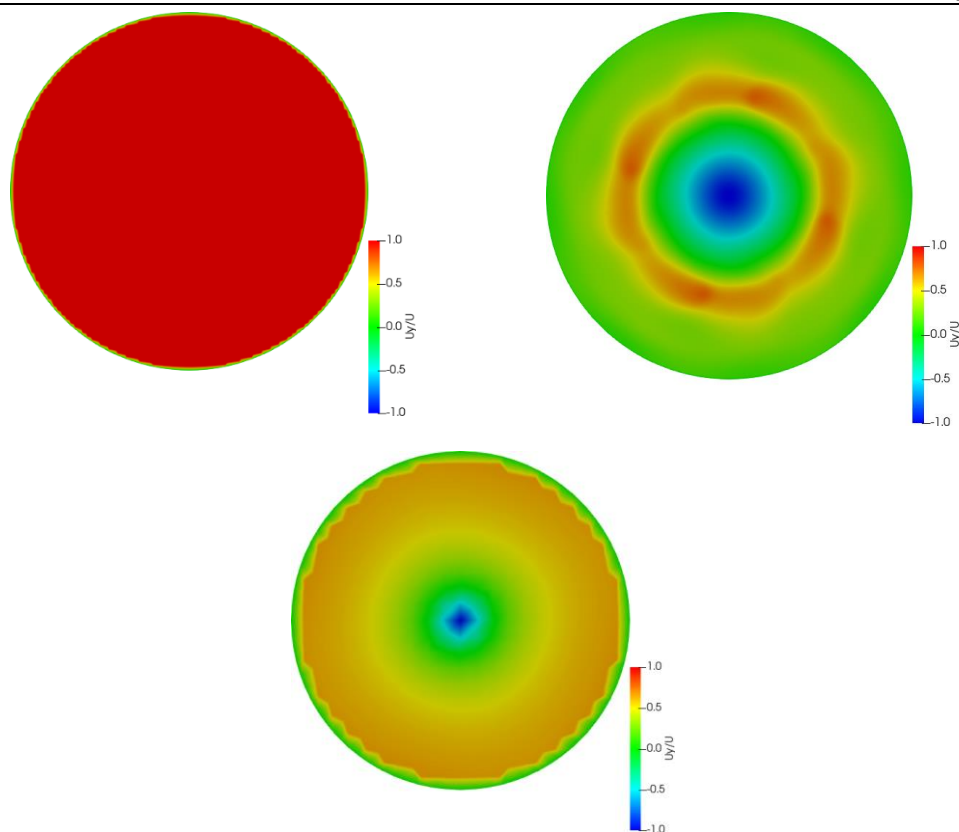


Slika 5.18 Polje tlaka za 110% Q_n

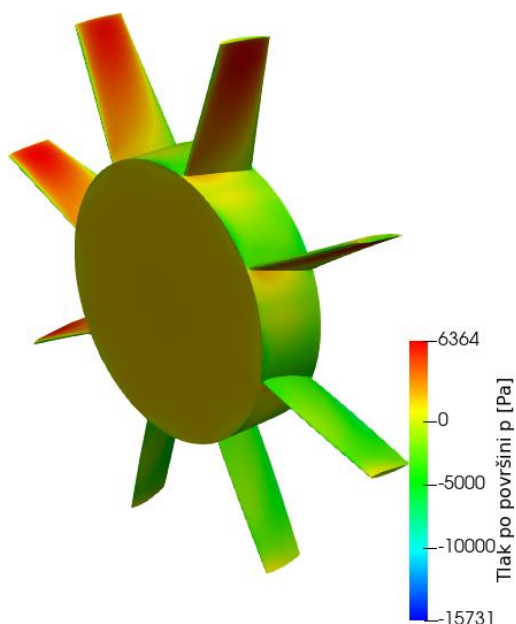
Rezultati strujanja za ovaj slučaj ne moraju biti nužno fizikalno točni. Strujanje za ovaj slučaj izgleda drugačije od prijašnjih slučajeva te se javlja problem protoka zraka kroz ventilator. Uz pretpostavku nestlačivog strujanja, javlja se problem u radu ventilatora gdje je narinuti protok prevelik kako bi sav prošao kroz ventilator.



Slika 5.19 Vektori brzine za 110% Q_n



Slika 5.20 Udio aksijalne komponente brzine strujanja za 110% Q_n na presjeku 1 (gore lijevo), 2 (gore desno) i 3 (dolje)

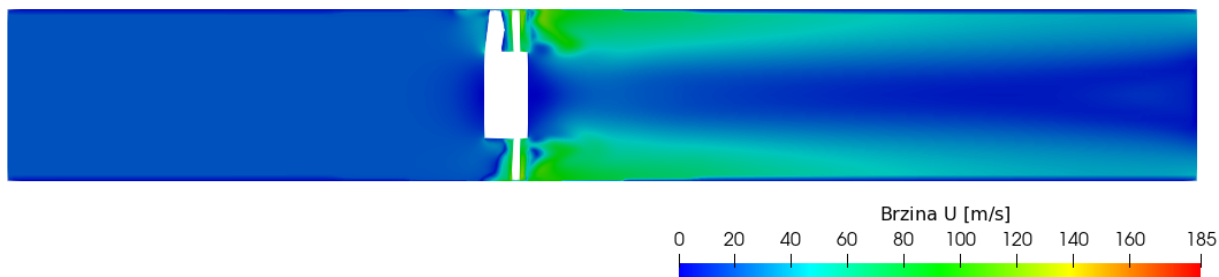


Slika 5.21 Tlak na površini za 110% Q_n

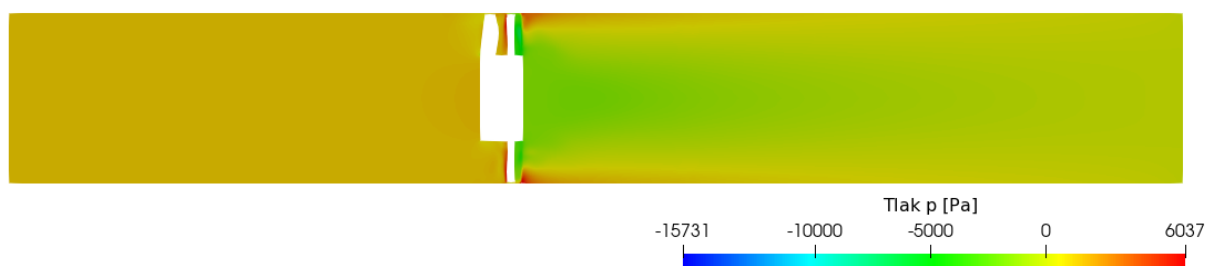
Pošto su brzine i tlakovi veći od istih za nominalni protok, u izračunu učinkovitosti može se očekivati porast učinkovitosti.

5.2 Aksijalni ventilator sa usmjeravajućim statorskim lopaticama ispred rotora

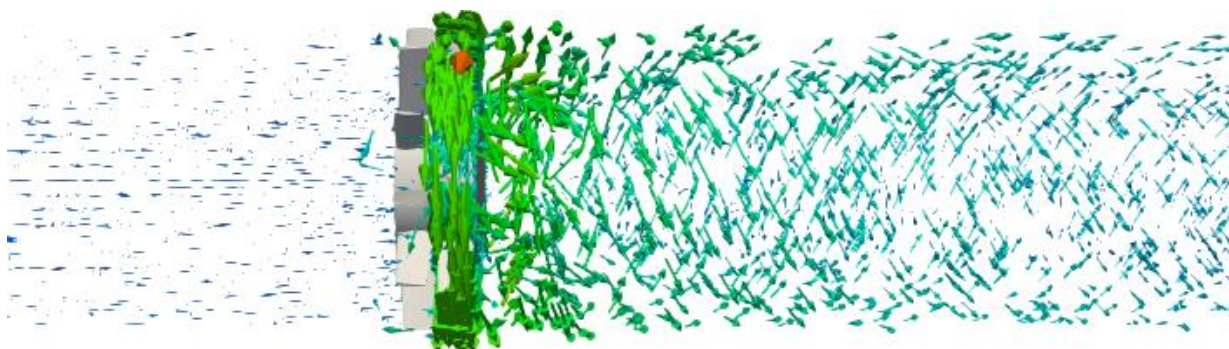
Kako bi se usporedio udio aksijalne komponente brzine strujanja, provedene su simulacije sa usmjeravajućim statorskim lopaticama. Prva izvedba je stator postavljen 50 mm ispred rotora [12]. Brzina, tlak i slika strujanja ispred statora su identični onima iz nominalnog slučaja izvedbe samo sa rotorom.



Slika 5.22 Polje brzine za izvedbu stator uzvodno

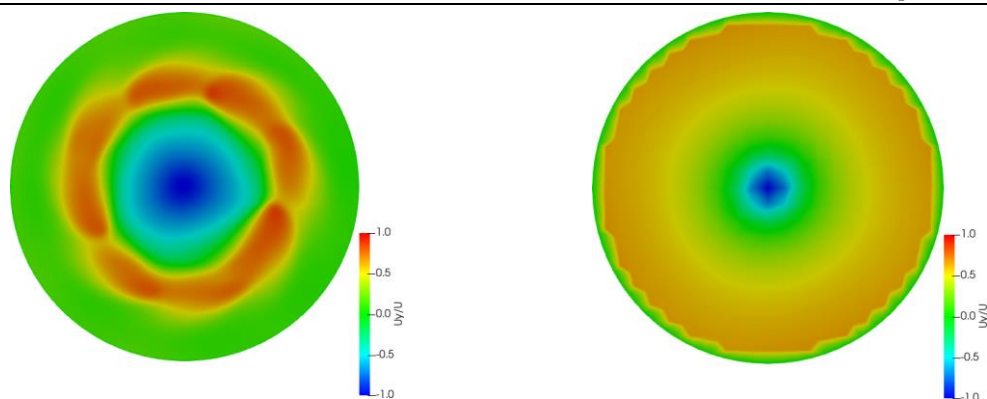


Slika 5.23 Polje tlaka za izvedbu stator uzvodno



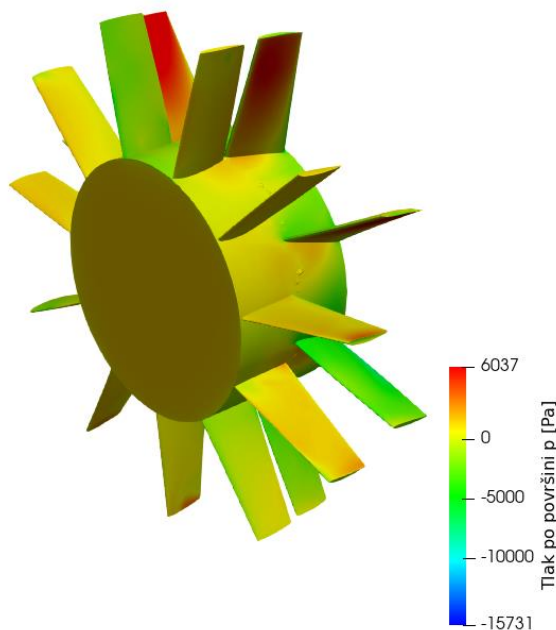
Slika 5.24 Vektori brzine za izvedbu stator uzvodno

Izvedbe sa statorom ispravljaju strujanje smanjivanjem tangencijalne komponente brzine U i tako povećavaju iskoristivost. Može se uočiti veća razlika tlakova ispred i iza rotacijske zone u usporedbi sa izvedbom bez usmjeravajućih statorskih lopatica.



Slika 5.25 Udio aksijalne komponente brzine strujanja za izvedbu stator uzvodno na presjecima 2 (lijevo) i 3 (desno)

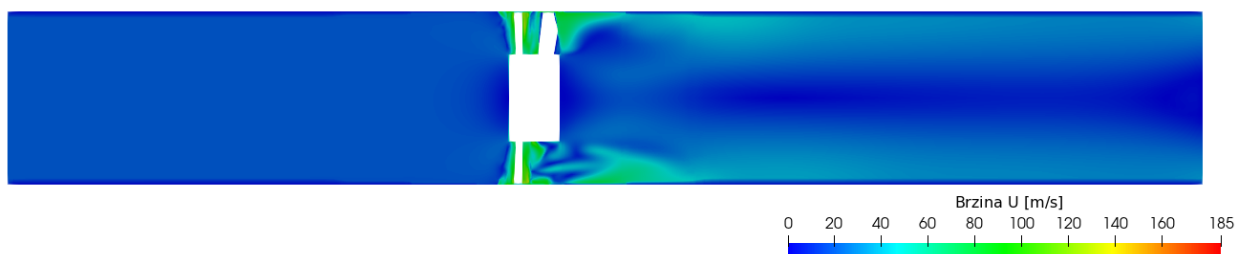
Na slici 5.25 nije postavljen presjek 1 jer je identičan onome na slici 5.6 strujanja za nominalni protok. Prema slici 5.24 teško je reći je li strujanje nakon statora i rotora manje ili više aksijalno od slučaja sa nominalnim protokom, zato se na slici 5.25 bolje vidi aksijalnost strujanja. Udio aksijalne komponente brzine strujanja za ovu izvedbu je slična onoj kod nominalnog protoka. Tek će se kasnijem poglavlju izračunavanja učinkovitosti vidjeti ima li stator zamjetan utjecaj.



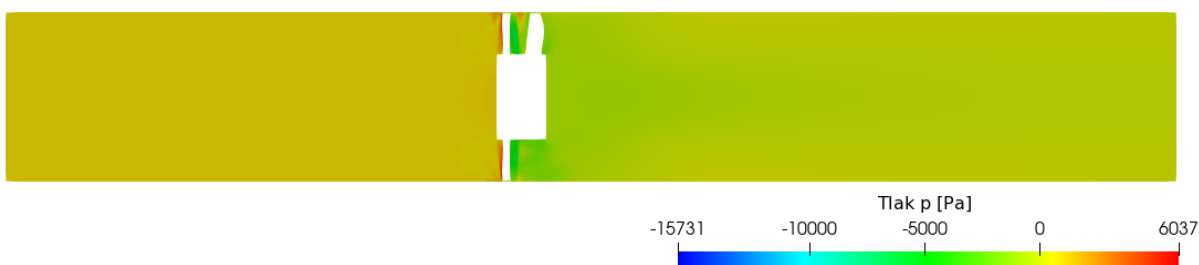
Slika 5.26 Tlak na površini statora i rotora

5.3 Aksijalni ventilator s usmjeravajućim statorskim lopaticama iza rotora

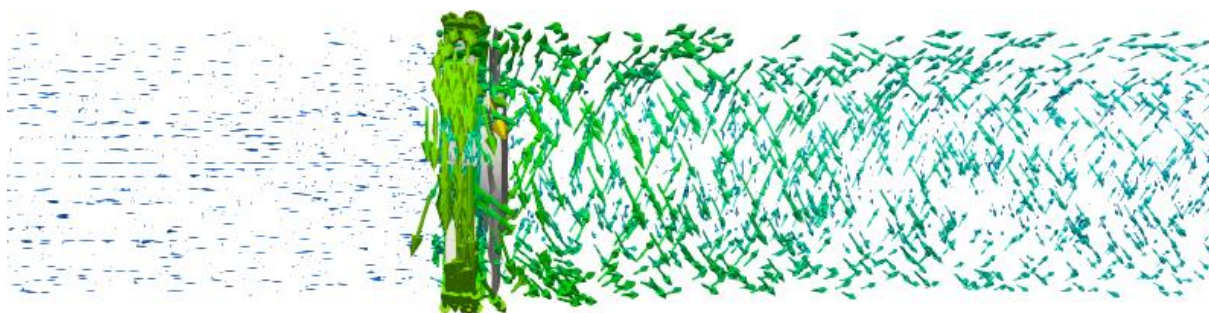
Sukladno prethodnom poglavlju i ova izvedba sadrži usmjeravajuće statorske lopatice i rotor, jedina razlika je u poziciji statora u odnosu na rotor. U ovoj izvedbi stator se nalazi 50 mm iza rotora [12]. Svi ostali ulazni parametri su istovjetni prethodnom slučaju.



Slika 5.27 Polje brzine za izvedbu stator nizvodno

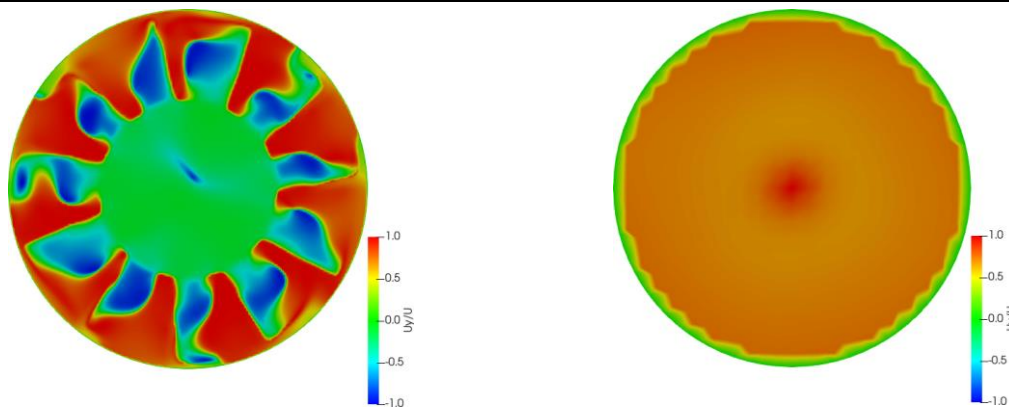


Slika 5.28 Polje tlaka za izvedbu stator nizvodno



Slika 5.29 Vektori brzine za izvedbu stator nizvodno

Na slikama 5.27 i 5.29 može se uočiti kako se odmah vidi utjecaj statora na strujanje. Iza statora efekt umanjivanja tangencijalne komponente brzine strujanja je puno izraženiji. Polje tlaka na slici 5.28 pokazuje manje izražene gradijente tlaka iza usmjeravajućih statorskih lopatica u usporedbi sa izvedbom statorskih lopatica ispred rotora.



Slika 5.30 Udio aksijalne komponente brzine strujanja za izvedbu stator nizvodno na presjecima 2 (lijevo) i 3 (desno)

Utjecaj statora najbolje se vidi na slici 5.30. Na presjeku 3 vidi se puno veće područje strujanja gdje je tangencijalna komponenta jako umanjena u odnosu na druga dva slučaja.

5.4 Izračun karakteristike ventilatora i usporedba učinkovitosti za slučaj s usmjeravajućim statorskim lopaticama

Za provedene simulacije očitava se vrijednost statičkog tlaka na presjeku 1 i presjeku 2 te im se dodaje vrijednost dinamičkog tlaka prema formuli:

$$p_{din} = p_{stat} + \rho \cdot \frac{U^2}{2} . \quad (5.1)$$

Nakon toga, oduzimaju se vrijednosti dinamičkog tlaka na presjeku 1 i 2 kako bi se dobila razlika u tlaku i izračunala snaga predana fluidu. Snaga se računa prema:

$$P = \Delta p \cdot Q . \quad (5.2)$$

I na kraju, učinkovitost se računa prema formuli:

$$\eta = \frac{P}{P_i} , \quad (5.3)$$

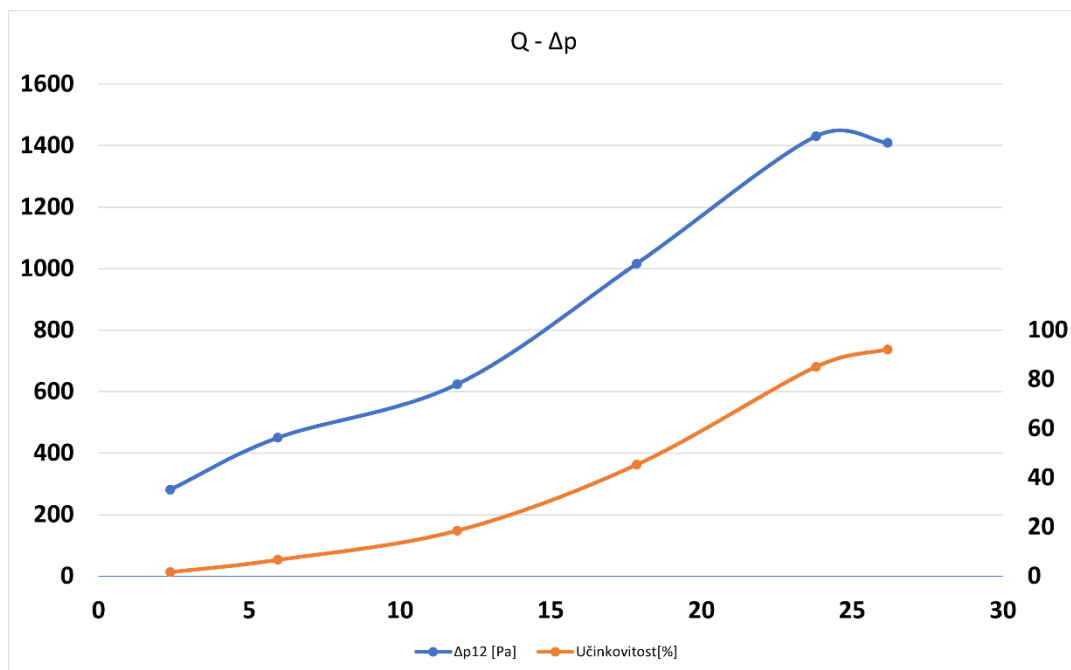
gdje P_i predstavlja snagu elektromotora za ventilator istih dimenzija. Za ovaj rad uzeta je $P_i = 40\,000\text{W}$ [14].

U sljedećoj tablici navedene su vrijednosti promjene tlaka i izračunate učinkovitosti za odgovarajući protok.

Tablica 6. Razlike tlakova i učinkovitosti

	Q [m ³ /s]	Δp [Pa]	η [%]
10% Q_n	2.38	281.61	1.66
25% Q_n	5.95	450.34	6.69
50% Q_n	11.9	624.32	18.57
75% Q_n	17.85	1016.33	45.35
Q_n	23.8	1430.9	85.14
110% Q_n	26.18	1409.1	92.23

Prema vrijednostima u Tablici 6. nacrtane su Q - Δp i Q - η karakteristike.

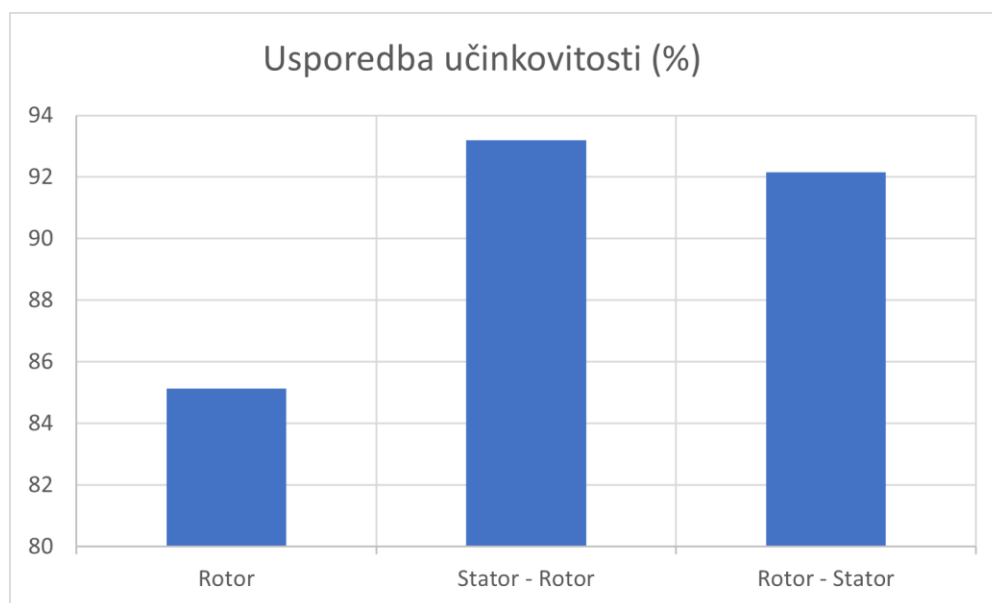
Slika 5.31 $Q - \Delta p$ i $Q - \eta$ karakteristike

Za područja s protokom većim od 110% Q_n bilo bi potrebno napraviti dodatne simulacije i razmotriti je li za te simulacije prikladno koristiti nestlačivi model strujanja. Ali s obzirom da karakteristika ventilatora ima negativni nagib nakon točke 110 Q_n može se pretpostaviti da će nagib ostati isti, a slično se može zaključiti i za krivulju Q - η prema općem obliku krivulje ventilatora. Na isti način izračunate su učinkovitosti i druge dvije izvedbe sa statorom za nominalni protok te su ti podaci dani u tablici ispod:

Tablica 7. Učinkovitosti pojedinih izvedbi : izvedba bez usmjeravajućih statorskih lopatica, izvedba sa usmjeravajućim statorskim lopaticama ispred rotora i izvedba sa usmjeravajućim statorskim lopaticama iza rotora

Rotor	Stator - rotor	Rotor - stator
85.2 %	93.2 %	92.2 %

Kao što se moglo pretpostaviti, dodavanje usmjeravajućih statorskih lopatica s ulogom ispravljanja strujanja nakon rotora ili zakretanja strujanja prije rotora kako bi nakon rotora aksijalna komponenta brzine bila što veća, poboljšava učinkovitost aksijalnog ventilatora.



Slika 5.32 Usporedba učinkovitosti izvedbe bez usmjeravajućih statorskih lopatica s izvedbama sa statorskim lopaticama ispred i iza rotora

6 ZAKLJUČAK

U ovom radu numeričkom metodom konstruirane su rotorske i statorske lopatice aksijalnog ventilatora prema zadanim parametrima nominalnog protoka od $Q_n = 23.8 \text{ m}^3/\text{s}$, odabrane brzine vrtnje koja iznosi 1780 o/min i zadanim vanjskim promjerom rotora $d_v = 1242 \text{ mm}$.

Provedeno je šest CFD simulacija s različitim protocima pri konstantnoj brzini vrtnje kako bi se konstruirala radna karakteristika ventilatora i usporedila učinkovitost izvedbi aksijalnog ventilatora bez sa ispred i sa iza. Da se izbjegne nepotrebno navođenje sličnih rezultata, pokazani su rezultati samo odabranih protoka. Dobivena karakteristika ventilatora pokazuje kako je optimalno područje rada ventilatora upravo za zadani protok.

Usporedba izvedbe samo s rotorom bez usmjeravajućih lopatica i izvedbi sa rotorom i usmjeravajućih lopaticama pokazala je kako dodavanje statora u ventilator povisuje učinkovitost ventilatora. Učinkovitost dobivena u slučaju nominalnog protoka od $23.8 \text{ m}^3/\text{s}$ iznosi 85.1%. U teoriji, strujanje fluida u izvedbama sa statorom bi trebalo biti potpuno aksijalno, no to je idealni slučaj. U ovom radu se pokazuje da čak i kod nepotpunog ispravljanja strujanja učinkovitost ventilatora raste ugradnjom usmjeravajućih lopatica statora. Vrijednosti učinkovitosti obje izvedbe sa statorom iznose oko 92% čime su znatno više od izvedbe aksijalnog ventilatora koji u svojoj konstrukciji sadrži samo rotor bez usmjeravajućih statorskih lopatica.

Navedene vrijednosti dobivene su uzimajući u izračunu iskoristivosti snagu elektromotora iz kataloga za ventilatore sličnih dimenzija te se njihova vrijednost može smatrati indikativnom za usporedbu različitih konfiguracija, ali ne predstavlja mjerenu vrijednost dobivenu u laboratorijskim uvjetima.

7 LITERATURA

- [1] Berliner Luft katalog
<https://www.berlinerluft.hr/proizvodi/kategorije> [Online; Siječanj 2024.]
- [2] B. Ristić, Pumpe i ventilatori, 1990.
- [3] E. Dick, Fundamentals of turbomachines, Springer, 2015.
- [4] Nastavni materijali, Hidraulički strojevi i postrojenja, 2023.
- [5] H. Jasak, Course materials for Numerical Methods in Continuum Mechanics Method, 2018.
- [6] L. Balatinec, Pregled metode povezivanja rotorske i statorske mreže u proračunskoj mehanici fluida za simulacije turbostrojeva, diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2019.
- [7] <http://wikki.co.uk/index.php/foam-extend/> [Online, Siječanj 2024.]
- [8] G. Cvijetić, Steady state methods for turbomachinery , diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2014.
- [9] H. Jasak, A. Jemcov, Ž. Tuković, OpenFOAM: A C++ library for complex physics simulations, in: International Workshop on Coupled Methods in Numerical Dynamics, IUC, 2007: pp. 1–20.
- [10] A. Horvat, Turbina za iskorištavanje energije uzgonskih sila u dimnjaku termoelektrane, diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2021.
- [11] V. Jakovljević, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2008.
- [12] K. M. Munisamy, R. Govindasamy, S. K. Thangaraju, Rotor-Stator Distance Effect onto Axial Fan Performance Improvement, 2012.
- [13] F. Juretić, cfMesh user guide, Creative Fields, Zagreb, 2015.
- [14] NOVENCO® TUNNEL JET FANS, katalog
<https://www.novenco-building.com/media/1336/novax-tunnel-cat-gb-mul6159-0322.pdf> [Online, Siječanj 2024.]