

Primjena računalne mehanike fluida u konstrukciji fenestron rotora

Marković, Marijan

Master's thesis / Diplomski rad

2021

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:235:301103>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-01**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Marijan Marković

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

PRIMJENA RAČUNALNE MEHANIKE FLUIDA U
KONSTRUKCIJI FENESTRON ROTORA

Mentor:

Prof. dr. sc. Željko Tuković

Student:

Marijan Marković

Zagreb, 2021.

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

Marijan Marković

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Željku Tukoviću što je pristao na mentoriranje studenta s drugog usmjerenja te na prenesenom znanju i posvećenom vremenu prilikom izrade ovog diplomskog rada!



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija zrakoplovstva



Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa: 602 - 04 / 21 - 6 / 1	
Ur. broj: 15 - 1703 - 20 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Marijan Marković**

Mat. br.: 0035200276

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Primjena računalne mehanike fluida u konstrukciji fenestron rotora**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Application of computation fluid dynamics in fenestron rotor design**

Opis zadatka:

Repni rotor helikoptera osigurava protudjelovanje momentu glavnog rotora, kako bi se spriječila rotacija trupa helikoptera te olakšalo upravljanje letjelicom. Iako se obično koristi konvencionalni otvoreni repni rotor s dvije do četiri lopatice, u primjeni su i repni ventilatori smješteni u kućištu koje je integrirano s repnom perajom helikoptera. Ovakav zaštićeni repni rotor je poznat pod nazivom fenestron i obično se sastoji od sedam do osamnaest podesivih rotorskih lopatica. Ugradnjom fenestron rotora, smanjuju se vrtložni gubici na vrhovima lopatica i buka, te se povećava sigurnost na tlu.

U sklopu diplomskog rada potrebno je provesti proračun (oblikovanje) kućišta i lopatica fenestron rotora za zadane karakteristike helikoptera promjenom računalne mehanike fluida. Proračun treba provesti kroz tri koraka:

1. Analiza utjecaja oblika kućišta ventilatora primjenom numeričke analize strujanja pri čemu je rotor ventilatora opisan modelom aktuatorskog diska. Na temelju provedene analize, potrebno je odabrati najpovoljniji oblik kućišta ventilatora.
2. Za prethodno određeni oblik kućišta ventilatora te protok zraka kroz ventilator uz zadani prirast tlaka, potrebno je oblikovati lopaticu ventilatora od korijena prema vrhu, primjenom numeričke simulacije strujanja kroz dvodimenzionalnu rotorsku rešetku.
3. Provjeriti konstrukciju dobivenog fenestron rotora provedbom numeričke simulacije trodimenzionalnog turbulentnog strujanja, pri čemu se rotacija rotorskih lopatica može opisati primjenom modela rotirajućeg koordinatnog sustava.

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

Zadatak zadan:

12. studenoga 2020.

Rok predaje rada:

14. siječnja 2021.


Predviđeni datumi obrane:

18. – 22. siječnja 2021.

Zadatak zadao:


Prof.dr.sc. Željko Tuković

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Milan Vrdoljak

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. ODABIR KARAKTERISTIKA HELIKOPTERA.....	3
2.1. Metodologija rada	5
3. ANALIZA UTJECAJA OBLIKA KUĆIŠTA.....	6
3.1. Geometrijski parametri rotora	7
3.1.1. Duljina kućišta <i>Lshroud</i>	8
3.1.2. Radijus lopatice i glavčine <i>Rblade, Rhub</i>	8
3.1.3. Veličina zazora <i>δtip</i>	8
3.1.4. Radijus ulazne usne <i>Rlip</i>	8
3.1.5. Duljina cijevi kućišta <i>Lduct</i>	9
3.1.6. Duljina difuzora <i>Ld</i>	9
3.1.7. Kut difuzora <i>θd</i>	9
3.2. Trokuti brzina.....	10
3.3. Izrada mreže	14
3.4. Prikaz i analiza rezultata	16
4. OBLIKOVANJE LOPATICE SIMULACIJOM STRUJANJA KROZ 2D ROTORSKU REŠETKU	18
4.1. Određivanje ulaznih vrijednosti brzine	18
4.2. Određivanje kuta zakreta strujanja.....	19
4.3. Odabir aeroprofila i konstrukcija domene strujanja.....	21
4.4. Izrada mreže i parametri simulacije	27
4.5. Prikaz rezultata.....	29
5. 3D ANALIZA TURBULENTNOG STRUJANJA FLUENT.....	31
5.1. Izrada Geometrije.....	31
5.2. Izrada Mreže.....	31
5.3. Parametri simulacije.....	33

5.3.1. Rubni uvjeti	33
5.3.2 Matematički model strujanja fluida.....	34
5.3.3. Opće postavke	35
5.4. Prikaz i analiza rezultata	35
6. ZAKLJUČAK.....	44
7. LITERATURA	45

POPIS SLIKA

Slika 1.1. Primjer helikoptera s Fenestron repnim rotorom [2]	2
Slika 1.2. Primjer helikoptera s konvencionalnim repnim rotorom [3]	2
Slika 2.1. Airbus EC135 prikaz [4]	3
Slika 3.1. Poprečni presjek kućišta Fenestron rotora	7
Slika 3.2. Trokut brzina.....	10
Slika 3.3 Distribucija vrtložne brzine po visini lopatice	13
Slika 3.4. Distribucija tlaka po visini lopatice za odabranu distribuciju vrtložne brzine.....	13
Slika 3.5. 2D prikaz domene za simulaciju	14
Slika 3.6. Prednji dio domene s ravninom aktuatorskog diska (desno)	15
Slika 3.7. Stražnji dio domene presječen s ravninom aktuatorskog diska (lijevo).....	15
Slika 3.8. Domena kućišta Fenestron rotora izbliza.....	16
Slika 3.9. Polje statičkog tlaka	16
Slika 3.10. Aksijalna komponenta brzine.....	17
Slika 3.11. Tangencijalna komponenta brzine	17
Slika 4.1. Aksijalna i tangencijalna komponenta brzine na lopatici	19
Slika 4.2 Kutevi strujanja na ulazu i izlazu lopatice	21
Slika 4.3. Prikaz 2D domene rotorske rešetke	22
Slika 4.4 Ulazni kut lopatice β_{1l} i ulazni kut strujanja β_1	24
Slika 4.5. Postavni kut lopatice β i ulazni kut lopatice β_{1l}	25
Slika 4.6. Napadni kut α	26
Slika 4.7. 2D mreže u Paraview-u.....	27
Slika 4.8. Polje statičkog tlaka kroz 2D rotorsku rešetku	29
Slika 4.9. Distribucija brzine kroz 2D rotorsku rešetku	30
Slika 5.1. Diskretizacija vanjske površinske prostorne domene	32
Slika 5.2. Diskretizacija vanjske površinske prostorne domene, uvećani prikaz.....	32
Slika 5.3. Diskretizacija prostorne domene (mreža)	32
Slika 5.4. Diskretizacija prostorne domene (mreža) oko aeroprofila.....	33
Slika 5.5. Intenzitet vektora brzine u meridijalnoj ravni.....	36
Slika 5.6. Aksijalna komponenta brzine.....	36

Slika 5.7. Aksijalna komponenta brzine na rotoru	37
Slika 5.8. Tangencijalna komponenta brzine	37
Slika 5.9. Tangencijalna komponenta brzine na rotoru.....	38
Slika 5.10. Radijalna komponenta brzine.....	38
Slika 5.11. Radijalna komponenta brzine (raspon od max do -5 m/s)	39
Slika 5.12. Polje statičkog tlaka u meridijalnoj ravnini	39
Slika 5.13. Podtlačna strana lopatice.....	40
Slika 5.14. Predtlačna strana lopatice.....	40
Slika 5.15. Lopatica - pogled s vrha.....	40
Slika 5.16. Statički tlak na 1/3 rotora s ulazne strane	41
Slika 5.17. Statički tlak na 1/3 rotora s izlazne strane.....	41
Slika 5.18. Prikaz strujnica kroz ravninu rotora.....	42
Slika 5.19. Konvergencije sile.....	42

POPIS OZNAKA

A	[m ²]	Površina diska rotora
A_b	[m ²]	Površina lopatica rotora
c	[m]	Duljina tetive lopatice
c_{d_0}	[-]	Nulti koeficijent otpora profila
d	[-]	Koeficijen raspodjele vrtložne brzine
E	[J/kg]	Totalna energija
e	[J/kg]	Unutarnja energija
f_i	[N]	Vanjska masena sila
h_0	[m ² /s ²]	Zaustavna entalpija
L_d	[m]	Duljina difuzora
L_{duct}	[m]	Duljina cijevi kućišta
L_{shroud}	[m]	Duljina kućišta
m_{TOW}	[kg]	Poletna masa helikoptera
M	[Nm]	Moment rotora
N	[-]	Broj lopatica rotora
P_{uk}	[W]	Ukupna snaga na rotoru
P_{ind}	[W]	Inducirana snaga na rotoru
P_{ind_profil}	[W]	Inducirana snaga radi otpora profila
p	[Pa]	Tlak
q_i	[W/m ²]	Toplinski tok
R	[m]	Radijus lopatice od centra rotacije
R_{blade}	[m]	Radijus lopatice od glavčine
R_{hub}	[m]	Radijus glavčine
R_{shroud}	[m]	Radijus ulazne usne kućišta
r	[m]	Radijus promatranog poprečnog presjeka

S_e	[J]	Energetski izvor ili ponor
s	[m]	Korak rešetke
T	[N]	Potisna sila rotora
T	[K]	Temperatura
u	[m/s]	Iznos prijenosne brzine na rotoru
v	[m/s]	Iznos apsolutne brzine na rotoru
v_a	[m/s]	Aksijalna komponenta apsolutne brzine
v_h	[m/s]	Inducirana brzina u režimu lebdjenja
v_{2u}	[m/s]	Tangencijalna komponenta apsolutne brzine
W	[N]	Težina
W_f	[J]	Rad vanjskih masenih sila
w	[m/s]	Iznos relativne brzine na rotoru
x_{rep}	[m]	Udaljenost centra repnog rotora od težišta
α	[°]	Napadni kut lopatice
β	[°]	Postavni kut lopatice
β_1	[°]	Kut relativne brzine na ulaznom bridu profila
β_{1l}	[°]	Ulazni kut lopatice
β_2	[°]	Kut relativne brzine na izlaznom bridu profila
$\Delta\beta$	[°]	Kut zakreta relativnog toka strujanja
$\Delta\beta_l$	[°]	Kut zakreta srednje linije lopatice
δ_{tip}	[m]	Duljina zazora između vrha lopatice i kućišta rotora
δ	[°]	Korekcija ulaznog kuta lopatice
η	[-]	Koeficijent hidrauličke iskoristivosti
κ	[-]	Koeficijent korekcije za viskozni otpor

λ	[W/mK]	Koeficijent toplinske vodljivosti
μ	[Ns/m ²]	Dinamička viskoznost fluida
ω	[rad/s]	Kutna brzina okretanja rotora
ρ	[kg/m ³]	Gustoća zraka
τ_{ij}	[Pa]	Naprezanje
θ_d	[°]	Kut difuzora

Indeksi

l	Ulazni brid aeroprofila
2	Izlazni brid aeroprofila
r	Korijen lopatice (eng. root)
t	Vrh lopatice (eng. tip)

Kratice

G.R.	Glavni rotor
R.R.	Repni rotor
2D	Dvodimenzionalan
3D	Trodimenzionalan

SAŽETAK

U radu je objašnjen postupak konstrukcije Fenestron rotora uz primjenu računalne mehanike fluida. Za numerički proračun strujanja korišteni su programski paketi OpenFOAM i Ansys Fluent. Proces konstrukcije rotora proveden je u tri koraka. Prvo je za zadani iznos sile na rotor odabrana primjerena veličina i oblik kućišta te je određena slika strujanja kroz rotor putem analize u Fluentu. U simulaciji je primijenjen „fan“ granični uvjet, kojim je modeliran prirast tlaka uzrokovan rotacijom lopatice i tako izračunata brzina strujanja te traženi maseni protok. Zatim je pomoću Pythona i OpenFOAMa konstruirana lopatica po segmentima primjenom simulacije strujanja kroz dvodimenzionalnu rotorsku rešetku. Za konstrukciju profila lopatice korišten je Python, gdje je napisana skripta za generiranje dvodimenzionalne domene strujanja s pripadajućim aeroprofilom NACA serije 4. Ulazni parametri profila su relativna debljina, pozicija maksimalne zakrivljenosti, zakrivljenosti srednje linije te broj diskretizacijskih segmenata. Treći dio proračuna se sastoji od kreiranja 3D modela Fenestron rotora s ciljem validacije promatranog strujanja. U trećem je koraku za opis lopatice primijenjen model rotirajućeg koordinatnog sustava. Za opis domene korištena je jedna rotorska lopatica primjenom periodičkog rubnog uvjeta što omogućava uštedu računalne snage i skraćivanje vremena trajanja simulacije.

Ključne riječi: OpenFOAM, Fluent, Python, lopatica, Fenestron rotor, rotorska rešetka, rotirajući koordinatni sustav.

SUMMARY

The paper explains the procedure of Fenestron rotor construction with the application of computational fluid dynamics. OpenFOAM and Ansys Fluent software packages were used for numerical flow calculation. The rotor construction process was carried out in three steps. First, the appropriate size and shape of the housing was selected for the given amount of force on the rotor, and the image of the flow through the rotor was determined by analysis in Fluent. In the simulation, a "fan" boundary condition was applied, which modeled the pressure increase caused by the rotation of the blade and thus calculated the flow velocity and the required mass flow. Then, using Python and OpenFOAM, the blade was constructed in segments using flow simulation through a two-dimensional rotor grid. Python was used to construct the blade profile, where a script was written to generate a two-dimensional flow domain with a corresponding NACA Series 4 airfoil. The input profile parameters are relative thickness, maximum curvature position, midline curvature, and number of discretization segments. The third part of the calculation consists of creating a 3D model of the Fenestron rotor with the aim of validating the observed flow. In the third step, a model of a rotating coordinate system was applied to describe the blade. One rotor blade was used to describe the domain by applying a periodic boundary condition, which saves computing power and shortens the simulation duration.

Keywords: OpenFOAM, Fluent, Python, blade, Fenestron rotor, rotor cascade, moving reference frame

1. UVOD

Helikopter je motorna letjelica teža od zraka koja može vertikalno uzlijetati i slijetati, lebdjeti i gibati se zrakom u svim smjerovima zahvaljujući približno horizontalno položenu propeleru, koji se naziva glavni rotor. Helikopter najčešće ima jedan glavni rotor, ali može ih biti i više (dva, rjeđe tri ili četiri). Helikopter s jednim glavnim rotorom mora imati uređaj koji sprječava okretanje helikoptera oko vertikalne osi zbog reaktivnoga momenta glavnog rotora. Helikopteri konvencionalne konfiguracije na kraju trupa imaju bočno usmjeren mali repni rotor koji kontrolom veličine aerodinamičke sile pilotu omogućuje kontriranje reaktivnog momenta glavnog rotora te zakretanje helikoptera oko vertikalne osi.

Konvencionalni repni rotor jednostavno je rješenje za kontriranje momenta glavnog rotora te mu je glavna prednost da zahtjeva razmjerno malu potrošnju snage i osigurava dobru kontrolu letjelice te stabilnost po pravcu u progresivnom letu. Nažalost, s obzirom da je to rotor otvorenog tipa, opasan je po ljude na zemlji koji se kreću blizu repa helikoptera, kao i za druge prepreke ili objekte koje lopatica može udariti uslijed nevještog upravljanja. Ovi nedostaci su tipični za manje i srednje helikoptere kojima se repni rotori nalaze bliže tlu gdje predstavljaju potencijalnu opasnost (za razliku od većih helikoptera kojima je repni rotor postavljen na većoj visini), te se tada može implementirati drugačije i sigurnije rješenje [1].

Sigurnije rješenje je Fenestron rotor (franc. „fenestrou“ mali prozor), koji se ponaša kao ventilator u kućištu. Razlikuje se od konvencionalnog jer se nalazi u kućištu koje je postavljeno ispod peraje helikoptera. Stavljanjem rotora u kućište dobiva se niz prednosti nad konvencionalnim rotorom. Smanjuju se gubitci zbog vršnih vrtloga te buka, dok je rotor zaštićen od potencijalnog sudara s objektima na tlu (ili u zraku). Uz očito povećanje sigurnosti, smještanjem rotora u kućište ostavlja se prostor za montiranje peraje na kraj repne grede helikoptera. Time se osigurava štednja goriva u ravnotežnom letu pri većim brzinama, gdje uzgonska sila na peraji doprinosi potisnoj sili repnog rotora za kontriranje momenta glavnog rotora. Nažalost jedan od nedostataka Fenestron rotora je da koristi nešto više snage u usporedbi s konvencionalnim rotorom što je razlog više da se ne koristi na velikim helikopterima. Na slikama 1.1. i 1.2. mogu se vidjeti primjeri helikoptera s Fenestron i konvencionalnim rotorom



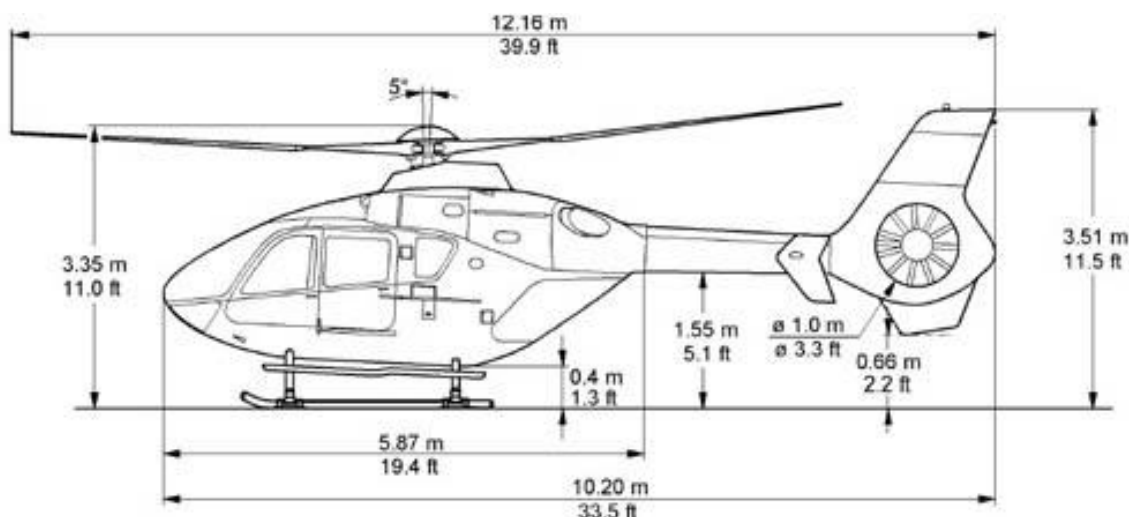
Slika 1.1. Primjer helikoptera s Fenestron repnim rotorom [2]



Slika 1.2. Primjer helikoptera s konvencionalnim repnim rotorom [3]

2. ODABIR KARAKTERISTIKA HELIKOPTERA

Kao što je navedeno i u uvodnom poglavlju, Fenestron rotori koriste se na manjim i srednjim helikopterima te će se u ovom radu razmatrati konstrukcija Fenestron rotora za helikopter srednje veličine. Kao ogledni primjer odabran je helikopter nalik na Airbus EC135 prikazan na slici 2.1. Maksimalna poletna masa prikazanog helikoptera iznosi $m_{TOW} = 2800$ kg. S obzirom da je masa vrlo bitan faktor prilikom projektiranja, ona direktno utječe na veličinu glavnog rotora te snagu motora koja se prenosi na glavni rotor.



Slika 2.1. Airbus EC135 prikaz [4]

S pretpostavkom da su na nekom proizvoljnom helikopteru težište i duljina repa zadani, proračun potisne sile mjerodavna je veličina za konstrukciju repnog rotora. Za procjenu potisne sile repnog rotora potrebno je naći okretni moment glavnog rotora. On se dobije proračunom prema [5] po relaciji:

$$M = \frac{P_{uk}}{\omega_{G.R.}}, \quad (2.1)$$

gdje je P_{uk} ukupna snaga na glavnom rotoru, a ω kutna brzina glavnog rotora. Ukupna snaga glavnog rotora se dobije zbrajanjem inducirane snage po teoriji diska, uvećane za gubitke radi viskozno strujanja (κ), te inducirane snage uslijed otpora profila lopatice:

$$P_{uk} = \kappa P_{ind} + P_{ind_profil}, \quad (2.2)$$

Inducirana snaga u lebdenju se prema teoriji diska računa kao:

$$P_{ind} = W \cdot v_h, \quad (2.3)$$

gdje je W težina helikoptera, a v_h inducirana brzina na glavnom rotoru kojoj odgovara relacija:

$$v_h = \sqrt{\frac{W}{2 \cdot \rho \cdot A_{G.G.}}}, \quad (2.4)$$

gdje je $\rho = 1.225 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$, a A površina diska glavnog rotora iznosa $A = 81.71 \text{ [m}^2\text{]}$, za iznos radijusa lopatice glavnog rotora od $R_{G.R.} = 5.1 \text{ m}$.

Inducirana snaga profila se računa po relaciji:

$$P_{ind_profil} = \frac{1}{8} \cdot \rho \cdot A_b \cdot (\omega_{G.R.} \cdot R_{G.R.})^3 \cdot c_{d_0}, \quad (2.5)$$

gdje je c_{d_0} nulti otpor profila lopatice, a A_b površina svih lopatica zajedno dobivena množenjem broja lopatica s polumjerom glavnog rotora te duljinom tetive lopatice po relaciji:

$$A_b = N \cdot c \cdot R_{G.R.}. \quad (2.6)$$

Uzevši poznate vrijednosti broja lopatica, duljine tetive, polumjera i kutne brzine glavnog rotora sa slike 2.1. od: $N_{G.R.} = 4$, $c_{G.R.} = 0.288 \text{ m}$, $R_{G.R.} = 5.1 \text{ m}$, $\omega_{G.R.} = 41.36 \text{ rad/s}$, te ako se za koeficijent gubitaka usljed viskoznosti uzme vrijednost $\kappa = 1.2$, i za nulti otpor profila lopatice $c_{d_0} = 0.02$, iznos momenta na glavnom rotoru je $M = 13688 \text{ Nm}$.

Uz procijenjenu momentnu ruku od $x_{rep} = 4.94 \text{ m}$ slijedi relacija:

$$T_{R.R.} = \frac{M}{x_{rep}} = 2771 \text{ N} \quad (2.7)$$

S obzirom da se radi o procjeni, smatra se da je očekivana protu-momentna potisna sila repnog rotora zadovoljena ukoliko se nalazi u rasponu od +/- 10% od tražene vrijednosti tj. između 2500 do 3050 N.

2.1. Metodologija rada

Konstrukcija Fenestron rotora provest će se za režim leta u lebdenju, gdje su zahtjevi na silu repnog rotora najveći te za koji je i tražena potisna sila na rotoru. Nepovoljni uvjeti, kao što je bočni vjetar neće biti razmatrani u sklopu ovog rada.

Uvjeti strujanja kroz repni rotor helikoptera će se promatrati na visini razine mora i pri temperaturi od $T=288.15$ K. Konstrukcija samog rotora je iterativni postupak koji je proveden u tri koraka.

Prvo je odabran optimalni oblik kućišta rotora proučavanjem literature u vezi strujanja kroz slične konstrukcije te primjenom programskog paketa Ansys Fluent, gdje je rotor opisan modelom aktuatorskog diska za izračunati prirast tlaka. Izrađen je 3D model s proizvoljnim kutem periodičnosti, a strujanje promatrano kao stlačivo.

Nadalje, odabirom zadovoljavajućeg oblika kućišta konstruirana je lopatica ventilatora po segmentima od korijena prema vrhu primjenom simulacije strujanja kroz 2D rotorsku rešetku u programskom paketu OpenFOAM. U ovom je dijelu simulacije strujanje promatrano kao nestlačivo.

Poslije toga je konstrukcija dobivenog Fenestron rotora provjerena putem 3D numeričke simulacije u Ansys Fluentu, pri čemu su korišteni periodički rubni uvjeti i model rotirajućeg koordinatnog sustava.

Prilikom trećeg koraka simulacije strujanje je ponovno promatrano kao stlačivo. Na kraju su rezultati validirani promatrajući sliku strujanja fluida kroz rotor kao i prikazom traženih veličina kao što su maseni protok kroz rotor te naposljetku potisna sila na rotor.

3. ANALIZA UTJECAJA OBLIKA KUĆIŠTA

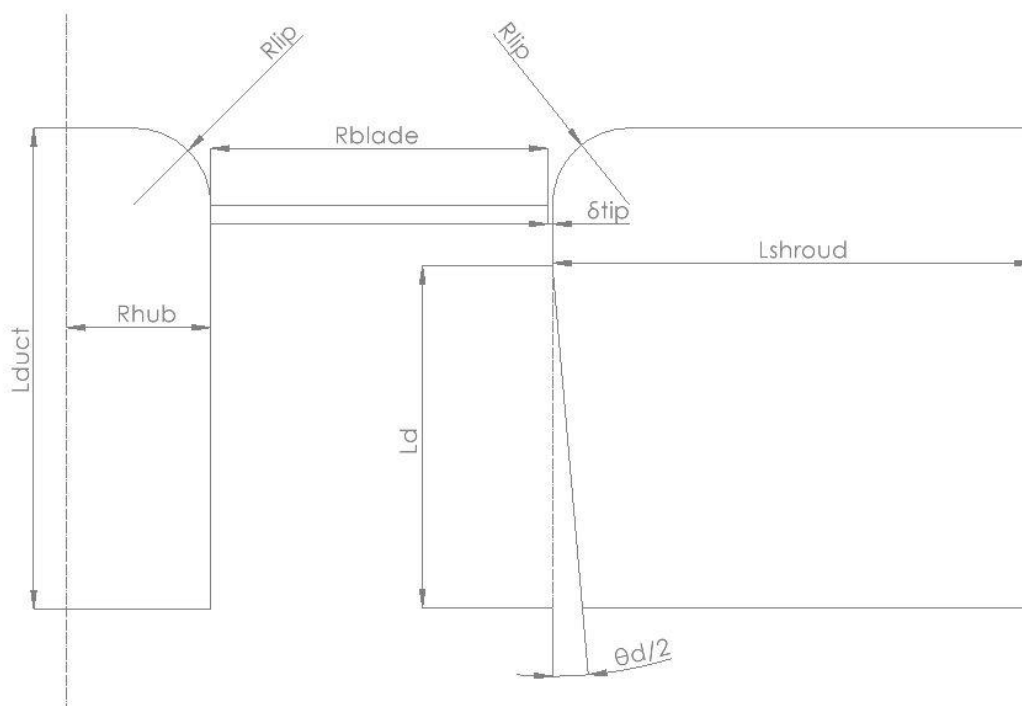
Prije nego se objasni sama analiza utjecaja geometrije kućišta rotora valja naglasiti par stvari vezanih uz odabrani model Fenestron rotora koji će biti predmet daljnje numeričke analize. Fenestron rotor smješten je u kućištu peraje helikoptera čija je svrha rasterećenje repnog rotora, kako se povećava horizontalna brzina leta helikoptera. S obzirom da je promatrani režim leta lebdenje, vertikalna peraja neće biti prikazana u modelu te se njen utjecaj neće razmatrati. Drugi razlog za isključenje peraje je korištenje periodičkog rubnog uvjeta pri modeliranju Fenestron rotora. Radi uštede računalnih resursa, bit će primijenjen model s periodičkim rubnim uvjetom, gdje će biti prikazana samo jedna rotorska lopatica s pripadajućim djelom kućišta rotora te repne konstrukcije

Daljnja pretpostavka je da je kućište oko lopatice osno-simetrično do određene udaljenosti od centra rotacije, što je neophodno za primjenu ovog modela. Ta udaljenost će biti proizvoljno određena, kako bi se olakšala konstrukcija domene strujanja, iako u realnoj konstrukciji ta duljina varira po obodu, pogotovo na dijelu gdje se nalazi repna peraja. To znači da se u modelu neće uzeti u obzir utjecaj cijevi u kojoj se nalazi vratilo za prijenos snage na glavni rotor. S obzirom da se geometrija gleda kao osnosimetrična, a geometrija kućišta u realnoj konstrukciji varira po obodu, neće se promatrati prestrujavanje fluida oko kućišta što je također slučaj realne konstrukcije. Samim time, iako doprinos kućišta potisnoj sili može biti značajan, radi asimetrične slike strujanja oko kućišta neće se uzeti u obzir u ovoj analizi. Kada bi se radila analiza cijelog repa, to bi zahijevalo veliku računalnu snagu i vrijeme, koji za izradu ovog rada nisu dostupni. Samo za primjer, prema [6] veličina mreže cijelog repa iznosi preko 22 milijuna ćelija.

Nadalje, iako su korisne za regeneraciju rotacijske komponente brzine, statorske lopatice neće biti uključene u model rotora radi jednostavnosti, kao i činjenice da njihovom implementacijom dodajemo neželjenu masu na helikopter.

3.1. Geometrijski parametri rotora

Na slici 3.1. prikazan je generički osnosimetrični poprečni presjek kućišta rotora, kakav je korišten za numeričke simulacije u sklopu ovog rada. Kao što je vidljivo na slici, više geometrijskih parametara samoga kućišta utječe na performanse rotora unutar kućišta. To su: duljina cijevi rotora u kućištu L_{duct} , radijus ulazne usne rotora R_{tip} , radijus glavčine R_{hub} , radijus lopatice R_{blade} , veličina zazora δ_{tip} , duljina difuzora L_d , te kut difuzora θ_d . Određivanje spomenutih veličina uglavnom se bazira na iskustvenim procjenama s variranjem nekog parametra za dobivanje željenih izlaznih vrijednosti, kao i empirijskim rezultatima dobivenim promatranjem sličnih rotora. Krajnja željena veličina je u ovom slučaju ostvarena potisna sila na rotoru uz što manji utrošak snage. To znači da bi trebalo težiti što manjoj induciranoj brzini na rotoru.



Slika 3.1. Poprečni presjek kućišta Fenestron rotora

3.1.1. Duljina kućišta L_{shroud}

Duljina kućišta L_{shroud} odabrana je proizvoljno kako bi se zadovoljio uvjet osnosimetričnosti i iznosi $L_{shroud} = 50$ cm

3.1.2. Radijus lopatice i glavčine R_{blade} , R_{hub}

Idealan teorijski slučaj bi bio kada bi rotor bio beskonačno velik, s beskonačno malim prirastom inducirane brzine i prema tome tlaka, no to je u praksi neizvedivo te treba težiti optimalnom rješenju za što manje penale mase uz prihvatljivu potrošnju snage. Stoga je prema sličnim modelima helikoptera odabran polumjer lopatice od $R_{blade} = 35$ cm te $R_{hub} = 15$ cm.

3.1.3. Veličina zazora δ_{tip}

Utjecaj veličine zazora je prilično jednostavan s obzirom na njegovu svrhu. Idealno bi bilo da je veličina $\delta_{tip} = 0$, kako bi se spriječilo prestrujavanje fluida s pretlačne na potlačnu stranu na vrhu lopatice. S obzirom da to u praksi nije moguće treba težiti što manjim vrijednostima koje se mogu postići modernim tehnologijama izrade odnosno zadovoljiti stroge tolerancije dimenzija, kako ne bi došlo do struganja lopatice od kućište rotora. Smatra se da je veličina od 1 % od $R_{blade} + R_{hub}$ zadovoljavajuća, odnosno $\delta_{tip} = 0.5$ cm.

3.1.4. Radijus ulazne usne R_{lip}

Ulazna usna primjenjuje se u konstrukciji Fenestron rotora radi povoljnog utjecaja na gibajući fluid. Naime, zaobljenje geometrije na ulazu u rotor stvara zonu podtlaka koja ubrzava strujanje prije nailaska na rotorsku rešetku.

Prema [7], variranjem radijusa usne na ulazu u kućište zaključeno je da smanjivanje radijusa rotora usne ispod vrijednosti od 13% $R_{blade} + R_{hub}$ rezultira odvajanjem strujanja od ulazne površine. Također je utvrđeno da je potreban radijus veći od 15% $R_{blade} + R_{hub}$ kako bi se postigle maksimalne performanse u lebdenju. Stoga je odabran radijus od 16% $R_{blade} + R_{hub}$ tj. $R_{lip} = 8$ cm.

3.1.5. Duljina cijevi kućišta L_{duct}

U idealnom slučaju lakše će se postići traženi potisak što je šire kućište rotora, odnosno što je duža cijev u kojoj se nalazi. Nažalost, to također donosi penale mase, kao i dodatnu silu otpora usljed odabira predugačke cijevi kućišta. Stoga bi gornja granica širine kućišta trebala biti širina repne grede helikoptera. U ovom je slučaju odabran iznos od $L_{duct} = 50$ cm.

3.1.6. Duljina difuzora L_d

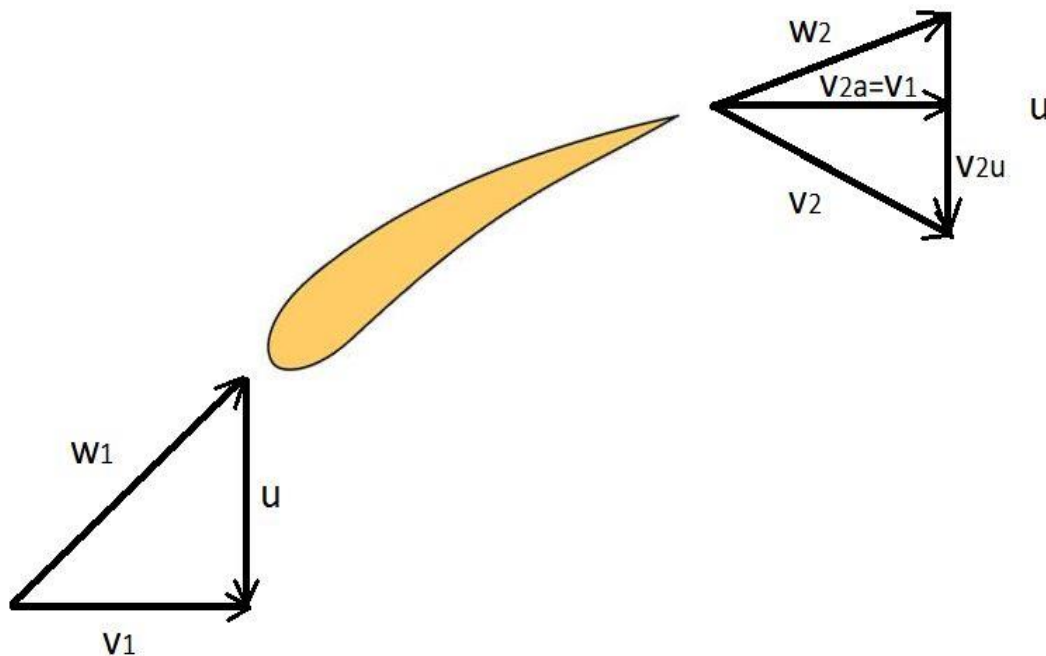
Idealno bi bilo da je difuzor što dulji, kako bi se dalo dovoljno vremena strujanju da uspori te pretvori kinetičku energiju u energiju tlaka. No, duljina difuzora je već ograničena duljinom cijevi kućišta te radijusom unutarnje usne. Stoga je odabrana duljina od 70 % L_{duct} te duljina difuzora iznosi $L_d = 35$ cm

3.1.7. Kut difuzora θ_d

Kut difuzora je bitan parametar s obzirom da diktira koliko će se strujanje usporiti i osigurati prirast statičkog tlaka. Naravno da se nemože povećavati u nedogled, kako ne bi došlo do odvajanja strujanja odabirom prevelikih kutova. Za ovaj parametar je napravljena analiza u Ansys/Fluentu, gdje su odabrana dva iznosa kuta difuzora od $\theta_d = 8^\circ$ i $\theta_d = 10^\circ$. Analizom je utvrđeno da za povećanje kuta difuzora uz držanje ostalih parametara konstantnim, maseni tok zraka kroz rotor raste za 3%, te tako olakšava postizanje tražene potisne sile. Stoga je odlučeno odabrati iznos od $\theta_d = 10^\circ$. Valja naglasiti, kako se moglo ići u daljnje povećanje kuta difuzora, ali prema [7], to ima negativne utjecaje na stabilnost letjelice radi interakciju vrtloga repnog rotora s vrtlogom glavnog rotora.

3.2. Trokuti brzina

Kutna brzina rotora odabrana je u skladu s veličinama sličnih rotora imajući na umu iznos radijus grla rotora, kako bi se izbjegli iznosi brzine veći od $Ma = 1$, koji bi uzrokovali pojavu udarnih valova. Stoga je za radijus grla rotora $R_t = 50.5$ [cm] odabrana kutna brzina prema sličnom rotoru [8] $\omega_{R.R.} = 376$ [$\frac{rad}{s}$], gdje se obodna brzina nalazi u rasponu od $u_r = 56.4$ [$\frac{m}{s}$] na korijenu lopatice do $u_t = 188$ [$\frac{m}{s}$] na vrhu lopatice.



Slika 3.2. Trokut brzina

Na slici 3.2. može se vidjeti prikaz trokuta brzina koje djeluju na lopaticu rotora, gdje vektorski zbroj relativne brzine w i prijenosne brzine u daje apsolutnu brzinu v . Važno je istaknuti pretpostavku da iznos aksijalne brzine ostaje konstantan prolaskom strujanja kroz rotor što se i vidi na prikazanoj slici, gdje je $v_{2a} = v_1$. Postavni kut lopatice β modelirat će se u odnosu na relativnu brzinu w , jer je to brzina koju lopatica „vidi“ u relativnom koordinatnom sustavu.

Kako bi se odredili postavni kutevi segmenata lopatice rotora po radijusu, potrebno je najprije odrediti raspodjelu aksijalne brzine po visini lopatice rotora. No, za taj proračun je potreban iznos masenog protoka kroz rotor.

Maseni protok kroz rotor je određen simulacijom u Ansys Fluent-u, gdje je za opis rotora korišten model aktuatorskog diska u kojemu će se zadan prirast tlaka. Traženi iznos prirasta tlaka dobije se jednostavnim dijeljenjem srednjeg iznosa tražene potisne sile s površinom diska:

$$p = \frac{T_{R.R.}}{A}, \quad (3.1)$$

gdje je A površina diska koja se računa po relaciji:

$$A = (r_t^2 - r_h^2) \cdot \pi \quad (3.2)$$

Dobiveni je iznos uvećan će se za 10% da se nadomjeste gubici tlaka usljed prestrujavanja fluida na vrhovima lopatica i gubici radi viskoznosti te iznos prirasta tlaka konačno iznosi $p = 4170$ [Pa].

Kako bi se dobio realističan prikaz rotacijske komponente brzine u tragu lopatice rotora prilikom izvođenja simulacije potrebno je zadati vrtložnu komponentu brzine v_{2u} prikazanu na slici 3.2. Brzina v_{2u} je tangencijalna komponenta apsolutne brzine na izlazu rotora (s obzirom da se nalazimo u apsolutnom koordinatnom sustavu), koja nam govori za koliko moramo zakrenuti tok, kako bi se postigao željeni prirast tlaka. Vrtložna brzina računa se iz Eulerove jednadžbe za aksijalni turbostroj prema [9]:

$$\Delta p(r) = \rho \cdot \left[u(r) \cdot v_{2u}(r) \cdot \eta - \frac{v_{2u}^2(r)}{2} \right], \quad (3.3)$$

gdje je η hidraulička iskoristivost procijenjena $\eta = 0.85$.

Kada bi se konstruirala lopatica gdje se iznos vrtložne brzine ne bi mijenjao po visini lopatice, mogla bi se odmah izračunati v_{2u} uvrštavanjem jednadžbe za prirast tlaka u jednadžbu (3.4) za poznatu potisnu silu:

$$T_{R.R.} = \int_{r_r}^{r_t} \Delta p(r) \cdot 2\pi r \cdot dr \quad (3.4)$$

Međutim, to nije od interesa s obzirom da se tok kod korijena lopatice ne bi mogao zakrenuti za željeni iznos te bi došlo do sloma uzgona. Stoga je moguće modelirati raspodjelu vrtložne brzine po radijusu lopatice prema izrazu:

$$v_{2u}(r) = v_{2u,r}(r) \cdot \left(\frac{r}{r_r}\right)^d \quad (3.5)$$

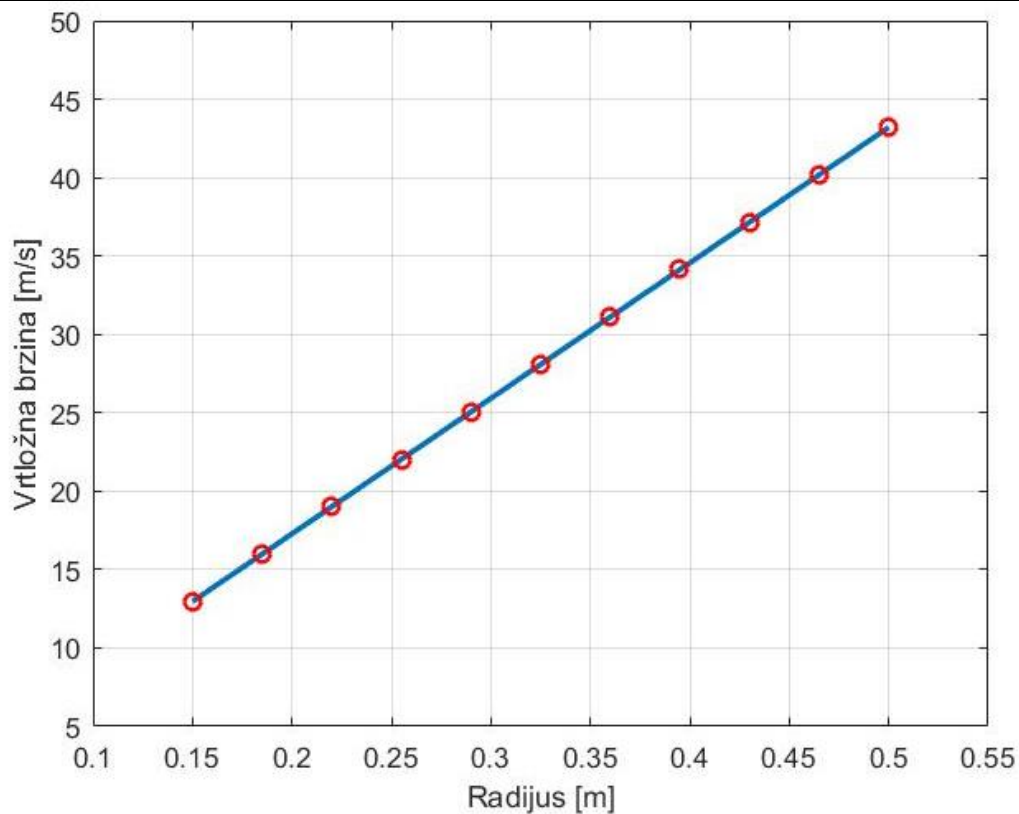
Uzevši da je $d=1$, odnosno linearnu raspodjelu, dobije se jednačba za distribuciju vrtložne brzine po radijusu lopatice. Uvrštavanjem u jednačbu (3.3) te potom u jednačbu (3.4) proizlazi:

$$v_{2u}(r) = 86.4 \cdot r \quad (3.6)$$

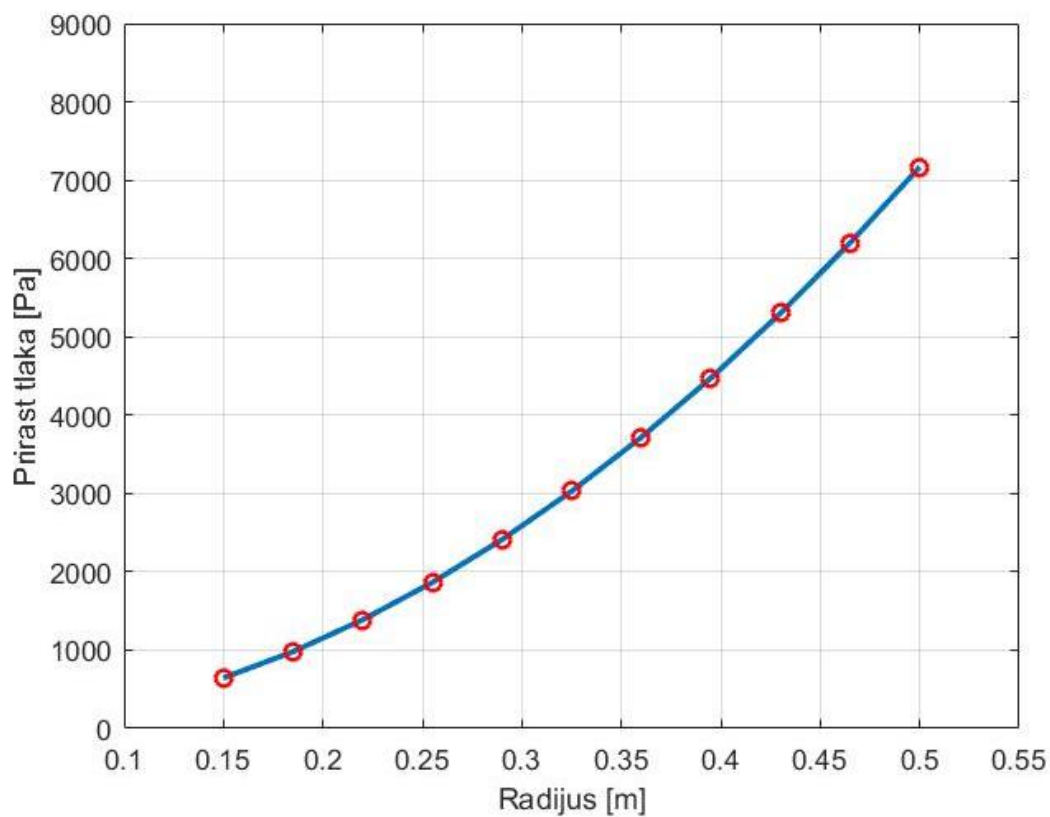
gdje su vrtložne brzine u korijenu i vrhu lopatice:

$$v_{2u,r} = 12.96 \left[\frac{m}{s}\right]; v_{2u,t} = 43.2 \left[\frac{m}{s}\right] \quad (3.7)$$

Na slici 3.3. je prikazana linearna distribucija vrtložne brzine dobivena prema jednačbi 3.6 za prethodno odabrani eksponent d , dok je na slici 3.4. prikazana distribucija prirasta tlaka prema jednačbi (3.3) za prikazanu vrtložnu brzinu.

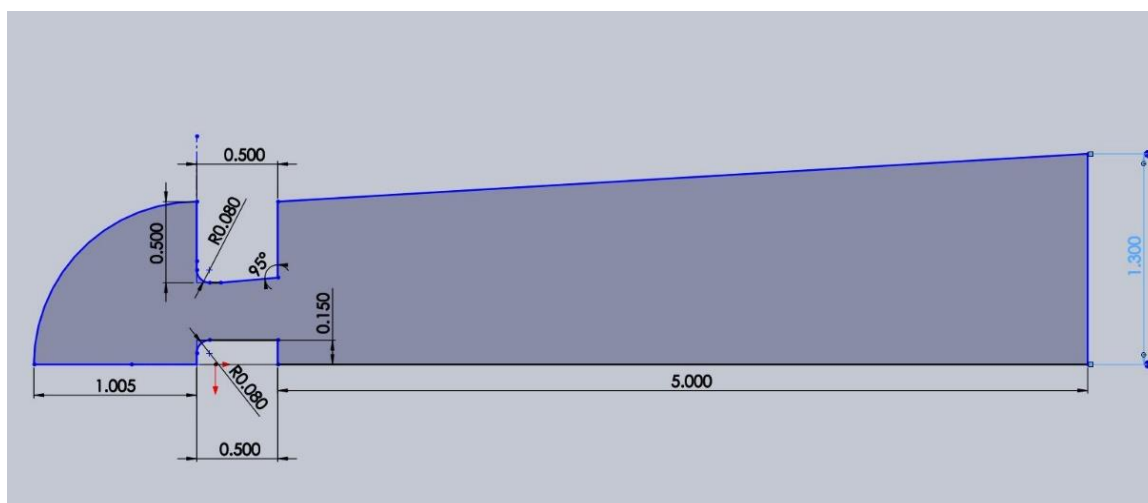


Slika 3.3 Distribucija vrtložne brzine po visini lopatice



Slika 3.4. Distribucija tlaka po visini lopatice za odabranu distribuciju vrtložne brzine

Nakon određivanja vrtložne komponente brzine može se pristupiti numeričkoj simulaciji. Za početak, potrebno je odrediti veličinu domene za simulaciju, kako bi se obuhvatio utjecaj ustrujavanja te istrujavanja fluida u i iz rotora. Domena strujanja je prikazana na slici 3.5. S obzirom da je u simulaciji korišten periodički rubni uvjet, 2D domena je jednostavno rotirana oko svoje donje osi za kut od 6° te tako predstavlja $1/60$ cijele domene promatranog strujanja.



Slika 3.5. 2D prikaz domene za simulaciju

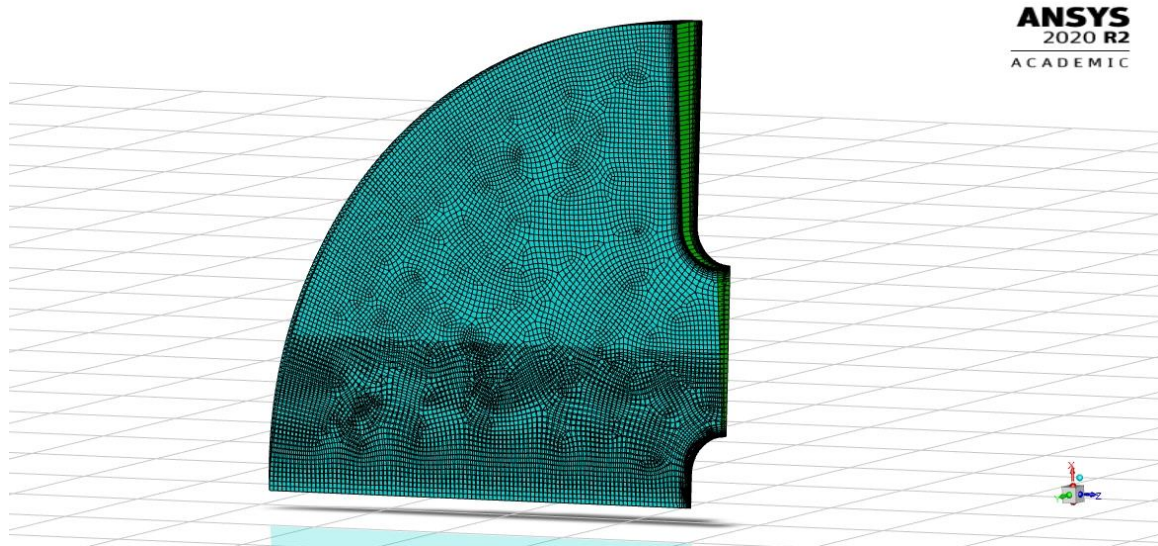
Ulaz u rotor je izrađen kao četvrtina kruga te mu je dodijeljen granični uvjet *pressure inlet* s vrijednošću atmosferskog tlaka. Izlaz iz kućišta rotora je produžen za 5 metara kako bi se obuhvatio utjecaj vrtložnog traga na rotor te mu je dodijeljen granični uvjet *pressure outlet*, gdje je postavljen uvjet da je statički tlak nula. Gornja blago nakrivljena dugačka ploha na izlazu iz rotora modelirana je kao *pressure inlet*, kako bi se uzeo u obzir utjecaj izlaznog toka iz rotora na okolni mirujući zrak na koji se prenosi energija te se inducira i počinje gibati. Ploha koja je nalazi na završetku ulazne usne rotora modelirana je pomoću *Fan* rubnog uvjeta, koji se ponaša kao aktuatorski disk, gdje je zadan željeni prirasta tlaka te vrtložna brzina.

3.3. Izrada mreže

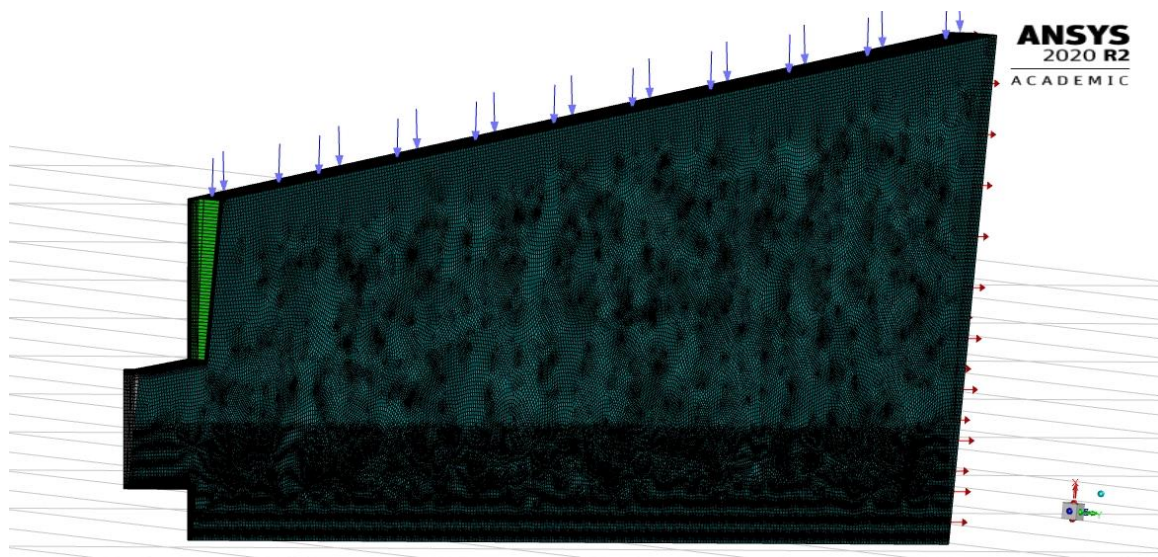
Nakon izrade 3D domene, napravljena je mreža koja je podijeljena u dva dijela s konformnom mrežom na spoju gdje se nalazi aktuatorski disk. Za potrebe konstruiranja mreže prvog dijela modeliranja rotora korišten je Ansysov program za izradu mreže *Mesh*. U domeni je profinjen dio mreže uz granice domene fluida korištenjem inflacije mreže za vjerniji prikaz efekta

graničnog sloja uz zidove kućišta i same lopatice rotora. Mreža se sastoji od 242 146 kontrolnih volumena heksaedarskog oblika.

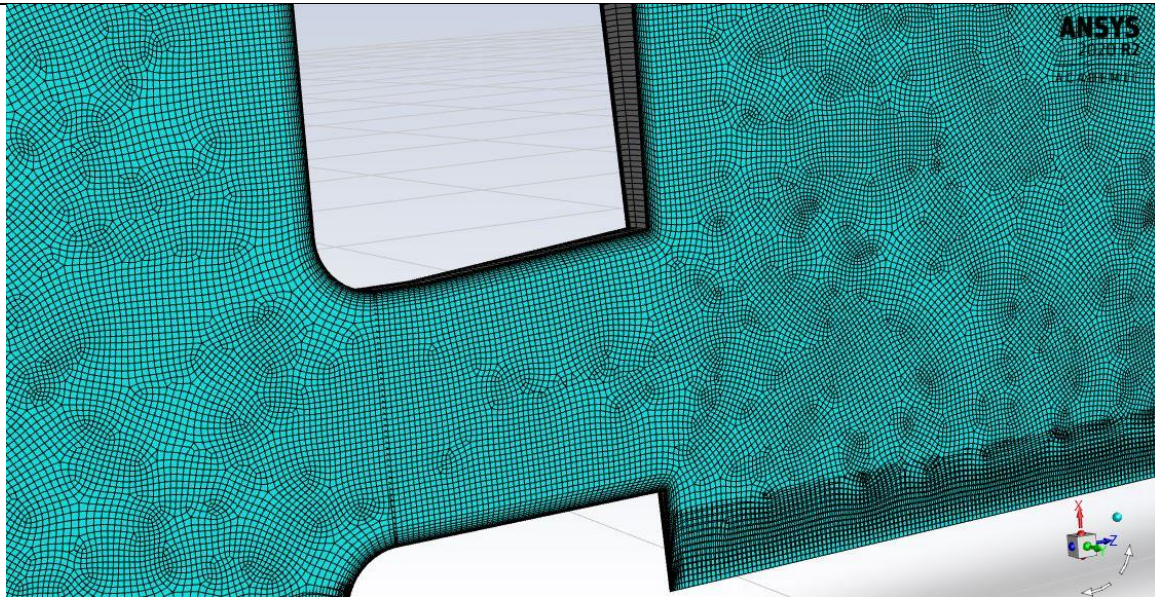
Na slikama 3.6. i 3.7. prikazana je mreža za dio domene prije i nakon aktuatorskog diska, dok je na slici 3.8 prikazan dio kućišta rotora s aktuatorskim diskom vidljiv na lijevoj strani kućišta.



Slika 3.6. Prednji dio domene s ravninom aktuatorskog diska (desno)



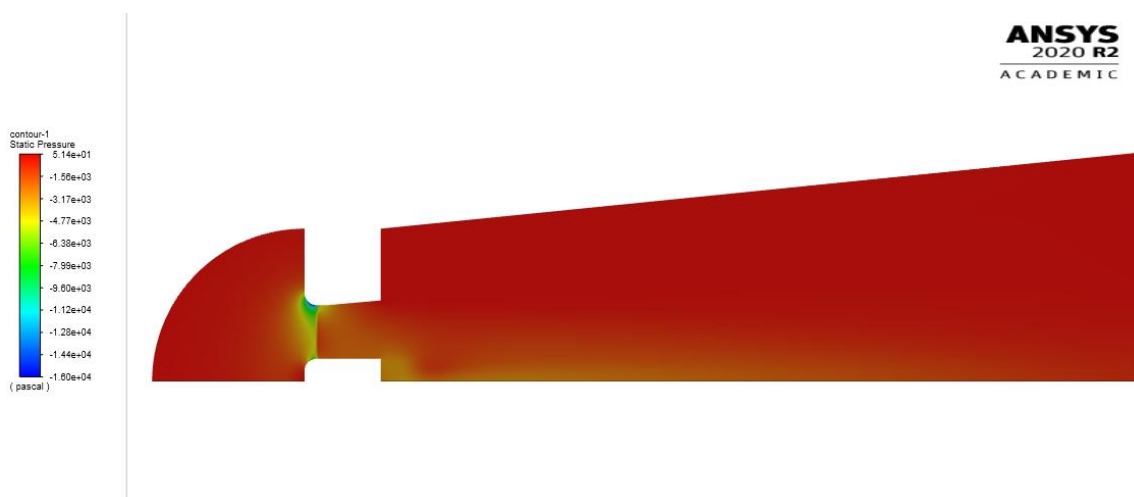
Slika 3.7. Stražnji dio domene presječen s ravninom aktuatorskog diska (lijevo)



Slika 3.8. Domena kućišta Fenestron rotora izbliza

3.4. Prikaz i analiza rezultata

Slika 3.9 prikazuje raspodjelu statičkog tlaka po srednjoj plohi domene, odnosno u x-z ravnini. Vidljivo je da je najveća razlika tlaka upravo oko aktuatorskog diska. Na dijelu prije aktuatorskog diska vidljiva je podtlačna zona osjenčana zeleno, kao i da je najveći pad tlaka upravo na dijelu gornje usne kućišta, gdje se tok najviše ubrzava.

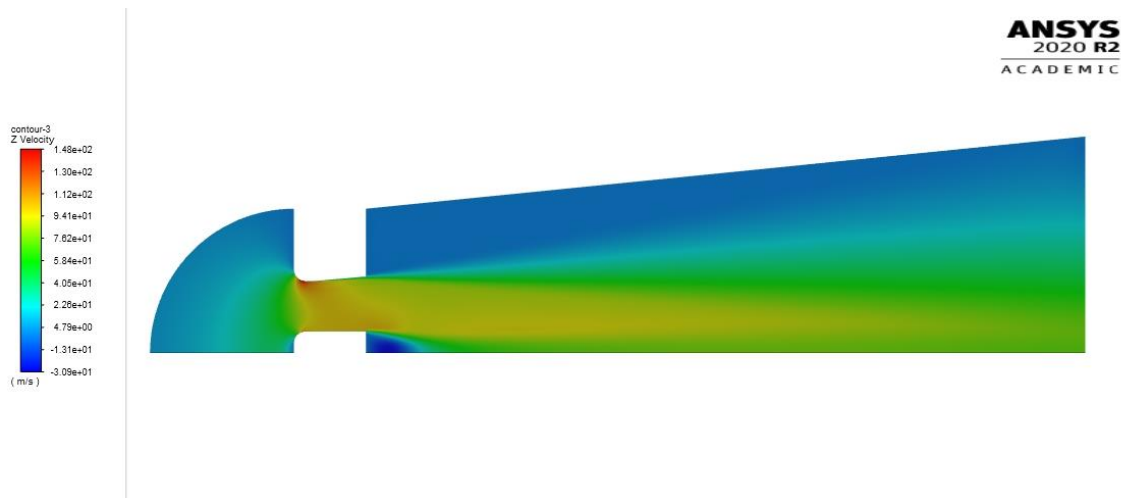


Slika 3.9. Polje statičkog tlaka

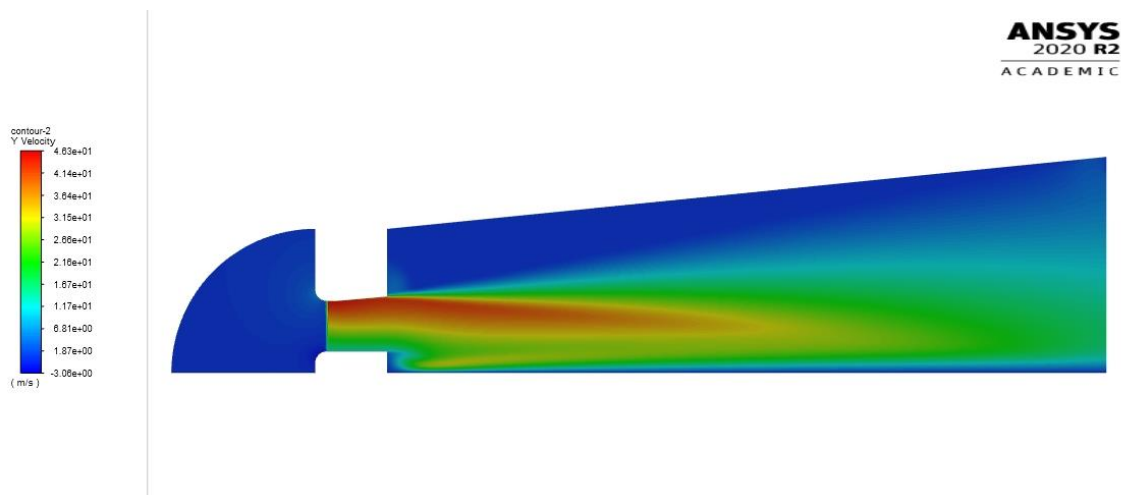
Na slikama 3.10 i 3.11 prikazane su konture brzina u aksijalnom i tangencijalnom smjeru. Aksijalna brzina prati očekivani trend te je najveća upravo u predjelu aktuatorskog diska s

maksimalnim iznosom na predjelu gornje usne kućišta gdje se nalazi najveći podtlak. Vrtložna brzina na izlazu iz rotora je ručno zadana radi korekcije protoka i provedena je računalna simulacija za stlačivo strujanje kroz rotor te dobiveni rezultati u skladu s očekivanjima.

Nakon provedene analize strujanja za dani prirast tlaka na rotoru, utvrđeni maseni protok zraka kroz rotor iznosi $Q = 1.506 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$ za 1/60 rotora, odnosno $Q = 90.36 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$ za cijeli rotor. Treba napomenuti da je naknadno provedena i analiza gdje je strujanje promatrano kao nestlačivo, no razlika u iznosu protoka je manja od 1% te služi kao usporedna vrijednost.



Slika 3.10. Aksijalna komponenta brzine



Slika 3.11. Tangencijalna komponenta brzine

4. OBLIKOVANJE LOPATICE SIMULACIJOM STRUJANJA KROZ 2D ROTORSKU REŠETKU

4.1. Određivanje ulaznih vrijednosti brzine

Kako je određen maseni protok fluida kroz rotor, može se odrediti distribucija aksijalne brzine kroz rotor da bi se pristupilo konstrukciji same lopatice. Brzina će se dobiti iz jednadžbe radijalne ravnoteže za 3D strujanje prema [7]. Uz pretpostavku da je promjena entropije po radijusu zanemariva, slijedi:

$$\frac{dh_0}{dr} = v_a \frac{dv_a}{dr} + \frac{v_{2u}}{r} \frac{d(rv_{2u})}{dr}, \quad (4.1)$$

gdje se zaustavna entalpija računa kao:

$$h_0(r) = u \cdot v_{2u} = \omega_{R.R.} (r \cdot v_{2u}(r)). \quad (4.2)$$

Kada se u jednadžbi 4.1 član za aksijalnu brzinu preuredi i smjesti zajedno pod derivaciju, jednadžba se okrene te se integrira po radijusu kao:

$$\frac{1}{2} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dv_a^2}{dr} dr = \int_{r_1}^{r_2} \left(\frac{dh_0}{dr} - \frac{v_{2u}}{r} \frac{d(rv_{2u})}{dr} \right). \quad (4.3)$$

Uvrstivši izraz za distribuciju vrtložne brzine, može se riješiti desni dio jednadžbe 4.3 provođenjem jednostavnih derivacija. Sređivanjem izraza dobije se:

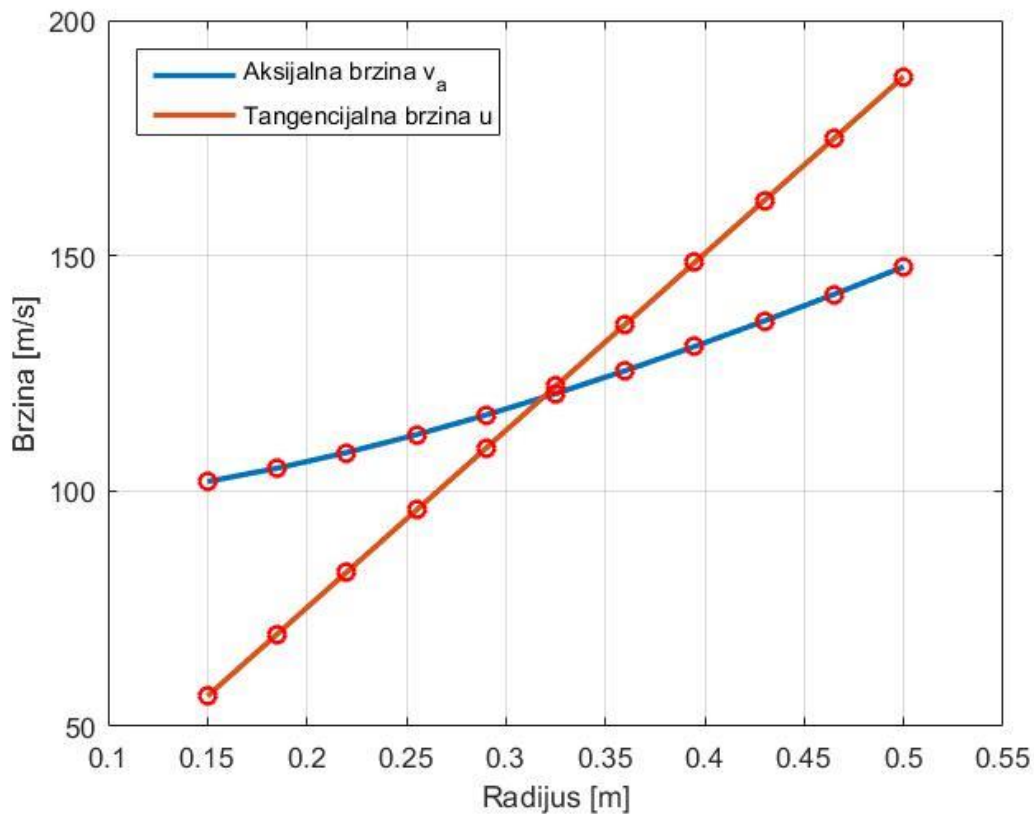
$$v_{a,r_2}^2 - v_{a,r_1}^2 = 52616 \cdot (r_2^2 - r_1^2). \quad (4.4)$$

Nakon dobivanja jednadžbe 4.4 treba iterativno uskladiti aksijalnu brzinu kako bi njena distribucija odgovarala protoku kroz rotor. U ovom slučaju, to je izvedeno putem python skripte, gdje je lopatica podijeljena na 10 segmenata tj. 11 aeroprofila i gdje se pretpostavila brzina u korijenu kao $v_{a,r_1} = v_{a,r}$.

Za ciljani protok određen je raspored brzine od $v_r = 102 \left[\frac{m}{s} \right]$ za brzinu na korijenskom aeroprofilu, do $v_t = 147.63 \left[\frac{m}{s} \right]$ na vršnom aeroprofilu lopatice. Iznosi promatranih radijusa lopatice na kojima se promatra strujanje te pripadajuće brzine za svaki radijus iznose:

$$v_1 = \begin{bmatrix} 102 \\ 104.84 \\ 108.17 \\ 111.95 \\ 116.14 \\ 120.69 \\ 125.56 \\ 130.73 \\ 136.14 \\ 141.79 \\ 147.63 \end{bmatrix} \left[\frac{m}{s} \right], u = \begin{bmatrix} 56.4 \\ 71.02 \\ 85.64 \\ 100.27 \\ 114.89 \\ 129.51 \\ 144.13 \\ 158.76 \\ 173.38 \\ 148.34 \end{bmatrix} \left[\frac{m}{s} \right], r = \begin{bmatrix} 0.15 \\ 0.185 \\ 0.22 \\ 0.255 \\ 0.29 \\ 0.325 \\ 0.36 \\ 0.395 \\ 0.43 \\ 0.465 \\ 0.5 \end{bmatrix} [m]. \quad (4.5)$$

Na slici 4.1. može se vidjeti grafički prikaz aksijalne i tangencijalne komponente brzine na lopatici u ovisnosti o radijusu.



Slika 4.1. Aksijalna i tangencijalna komponenta brzine na lopatici

4.2. Određivanje kuta zakreta strujanja

Prema slici 3.2 mogu se odrediti kutovi relativnog toka strujanja na ulazu i izlazu iz rešetke β_1 i β_2 , koji se mjere u odnosu na smjer aksijalne komponente brzine. Određeni su jednadžbama:

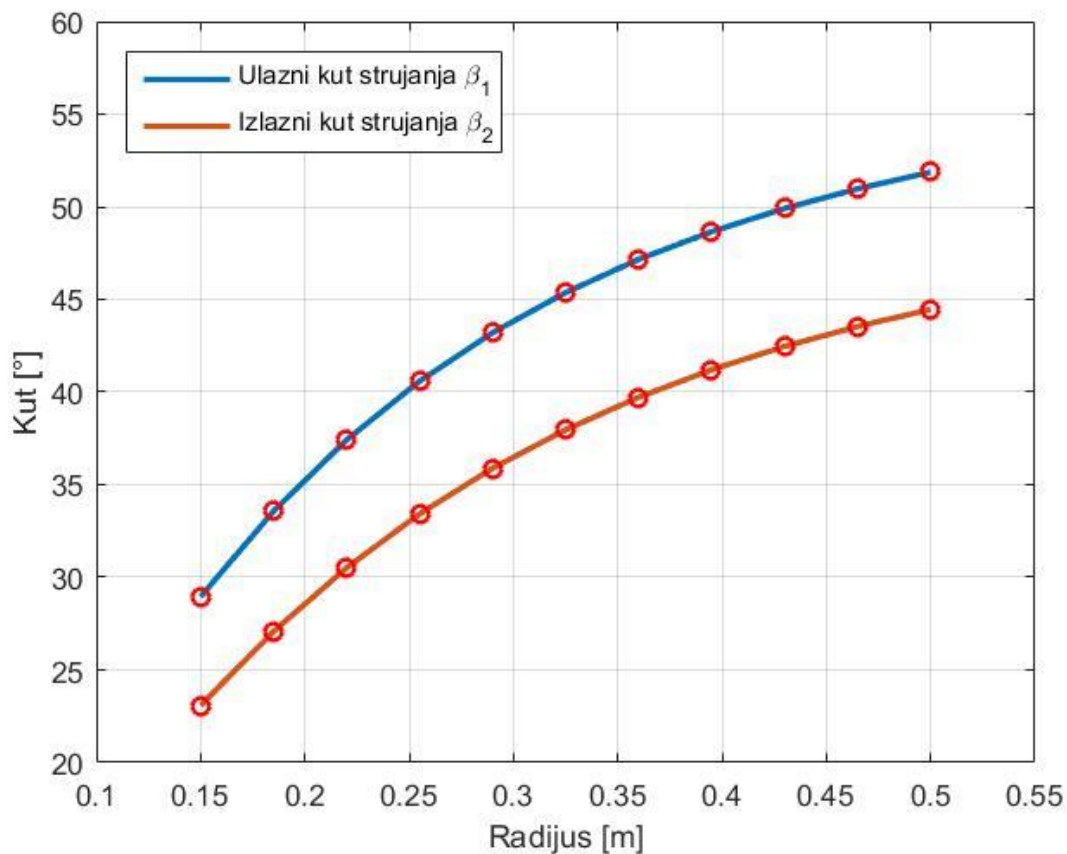
$$\beta_1(r) = \arctan\left(\frac{u(r)}{v_1(r)}\right), \quad (4.6)$$

$$\beta_2(r) = \arctan\left(\frac{u(r) - v_{2u}(r)}{v_1(r)}\right). \quad (4.7)$$

Prilikom izračuna pretpostavlja se da je aksijalna komponenta brzine konstantne veličine kroz rešetku tj. vrijedi da je $v_{2a}(r) = v_1(r)$. Iznosi kutova strujanja relativne brzine te njihove razlike tj. kuta zakreta relativnog toka $\Delta\beta = \beta_1 - \beta_2$ iznose :

$$\beta_1 = \begin{bmatrix} 28.95 \\ 33.58 \\ 37.42 \\ 40.59 \\ 43.21 \\ 45.37 \\ 47.16 \\ 48.66 \\ 49.91 \\ 50.97 \\ 51.87 \end{bmatrix} [^\circ], \quad \beta_2 = \begin{bmatrix} 23.08 \\ 27.08 \\ 30.51 \\ 33.42 \\ 35.89 \\ 37.96 \\ 39.72 \\ 41.20 \\ 42.46 \\ 43.54 \\ 44.46 \end{bmatrix} [^\circ], \quad \Delta\beta = \begin{bmatrix} 5.87 \\ 6.49 \\ 6.91 \\ 7.17 \\ 7.32 \\ 7.40 \\ 7.44 \\ 7.46 \\ 7.45 \\ 7.43 \\ 7.41 \end{bmatrix} [^\circ], \quad (4.8)$$

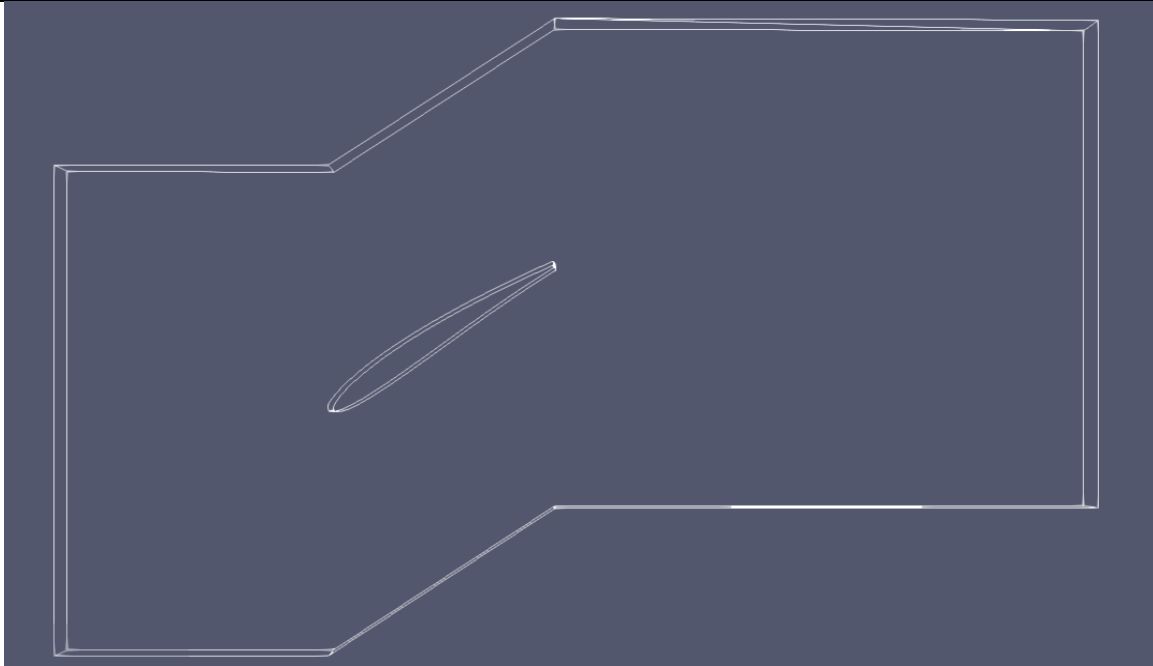
te su prikazani na slici 4.2.



Slika 4.2 Kutevi strujanja na ulazu i izlazu lopatice

4.3. Odabir aeroprofila i konstrukcija domene strujanja

Nakon određivanja željene distribucije aksijalne brzine, može se pristupiti oblikovanju aeroprofila po segmentima lopatice rotora. Za konstrukciju lopatice je korišten python. Prvo je napisana skripta za ispis aeroprofila iz NACA 4 serije, gdje su ulazne varijable broj segmenata diskretizacije, relativna debljina, pozicija maksimalne zakrivljenosti te zakrivljenost srednje linije. Također je napisana skripta za konstrukciju kompletne domene strujanja kroz 2D rotorsku rešetku. Domena se sastoji od odabranog aeroprofila, ulaznog i izlaznog dijela koji se nalaze netom prije te iza samog profila, i gornje i donje granice koje će se modelirati periodičkim rubnim uvjetima. Prikaz cijele domene nalazi se na slici 4.3.



Slika 4.3. Prikaz 2D domene rotorske rešetke

Prilikom ovog djela konstrukcije, treba se odrediti broj lopatica kako bi se mogla izraditi 2D domena strujanja za svaki segment lopatice. Broj lopatica je potreban za određivanje koraka rešetke, odnosno razmaku između profila dvije susjedne lopatice u ovisnosti o radijusu na kojem se nalaze prema izrazu:

$$s(r) = \frac{2r\pi}{N_{R.R.}}, \quad (4.9)$$

gdje je s korak rešetke u ovisnosti o radijusu, a N broj lopatica u iznosu $N_{R.R.} = 15$. Veći broj lopatica odabran je kako bi se osiguralo dovoljno zakretanje strujanja te postigao zadani prirast tlaka, pogotovo na vršnom dijelu lopatice, gdje je korak rešetke najveći. Također, treba odrediti duljinu tetive aeroprofila koja će se držati konstantnom po duljini lopatice.

Prilikom određivanja duljine tetive treba paziti na maksimalni iznos tetive aeroprofila u korijenu, kako ne bi došlo do preklapanja lopatica kada im je iznos postavnog kuta u korijenu $\beta = 90^\circ$. To se može lako provjeriti za odabrani broj lopatica prema:

$$c_r \cdot N_{R.R.} < 2r_r\pi \quad (4.10)$$

za odabarni broj lopatica slijedi:

$$c_r < \frac{2r_r\pi}{N_{R.R.}} = 6.28 \text{ [cm]}. \quad (4.11)$$

Stoga je za duljinu tetive odabrano $c = 6$ [cm]. Iznos relativne debljine lopatice iznosi 10%, a pozicija najveće zakrivljenosti aeroprofila je na 50% duljine tetive te su kao i tetiva držani konstantni po visini lopatice.

Kut zakreta srednje linije lopatice $\Delta\beta_l$ dobiva se množenjem kuta zakreta relativnog toka $\Delta\beta$ s koeficijentom povećanja prema:

$$\Delta\beta_l = k \cdot \Delta\beta. \quad (4.11)$$

Koeficijent povećanja je iskustveno odabran konstantan po cijeloj visini lopatice u iznosu $k=2$. To znači da je odabrani profil zakrivljeniji prema vrhu lopatice i tako pomaže lakšem zakretanju toka fluida.

Uz spomenute geometrijske parametre, u skripti za izradu domene također se zadaje i postavni kut lopatice β koji je isto ulazni parametar za izradu domene. On će biti tražena varijabla za postizanje zadanog prirasta tlaka po visini lopatice te se pronalazi iterativno. Postavni kut je zadan kao:

$$\beta = \beta_{1l} - \Delta\beta, \quad (4.12)$$

gdje je β_{1l} ulazni kut lopatice zadan kao:

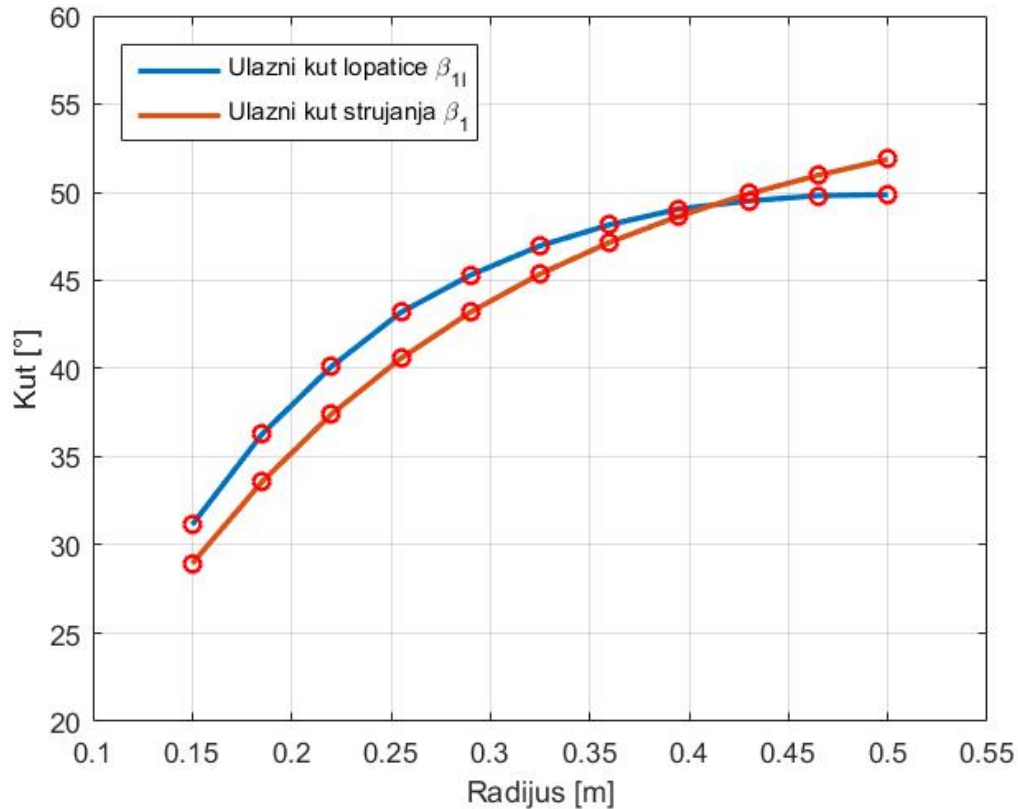
$$\beta_{1l} = \beta_1 + \delta. \quad (4.13)$$

U jednadžbi 4.13 δ predstavlja korekciju ulaznog kuta lopatice te je on varijabla koja se iterira za postizanje željenog prirasta tlaka po segmentima. Rezultat se korigira dok se ne dođe do postavnog kuta za koji razlika tlaka na ulaznoj i izlaznoj plohi odgovara vrijednostima izračunatima u prethodnom koraku (slika3.4.).

Nakon provedenih iteracija za korekciju ulaznog kuta lopatice rezultati za δ , β_{1l} i β su:

$$\delta = \begin{bmatrix} 2.2 \\ 2.7 \\ 2.7 \\ 2.6 \\ 2.1 \\ 1.6 \\ 1 \\ 0.4 \\ -0.4 \\ -1.16 \\ -2 \end{bmatrix} [^\circ], \quad \beta_{1l} = \begin{bmatrix} 31.15 \\ 36.27 \\ 40.12 \\ 43.19 \\ 45.31 \\ 46.97 \\ 48.16 \\ 49.06 \\ 49.51 \\ 49.81 \\ 49.87 \end{bmatrix} [^\circ], \quad \beta = \begin{bmatrix} 25.28 \\ 29.78 \\ 33.21 \\ 36.02 \\ 37.98 \\ 39.56 \\ 40.72 \\ 41.60 \\ 42.06 \\ 42.37 \\ 42.46 \end{bmatrix} [^\circ]. \quad (4.14)$$

Na slici 4.4. vidi se prikaz ulaznog kuta lopatice β_{1l} i ulaznog kuta strujanja β_1 . Razlika između njih predstavlja korekciju δ .



Slika 4.4 Ulazni kut lopatice β_{1l} i ulazni kut strujanja β_1

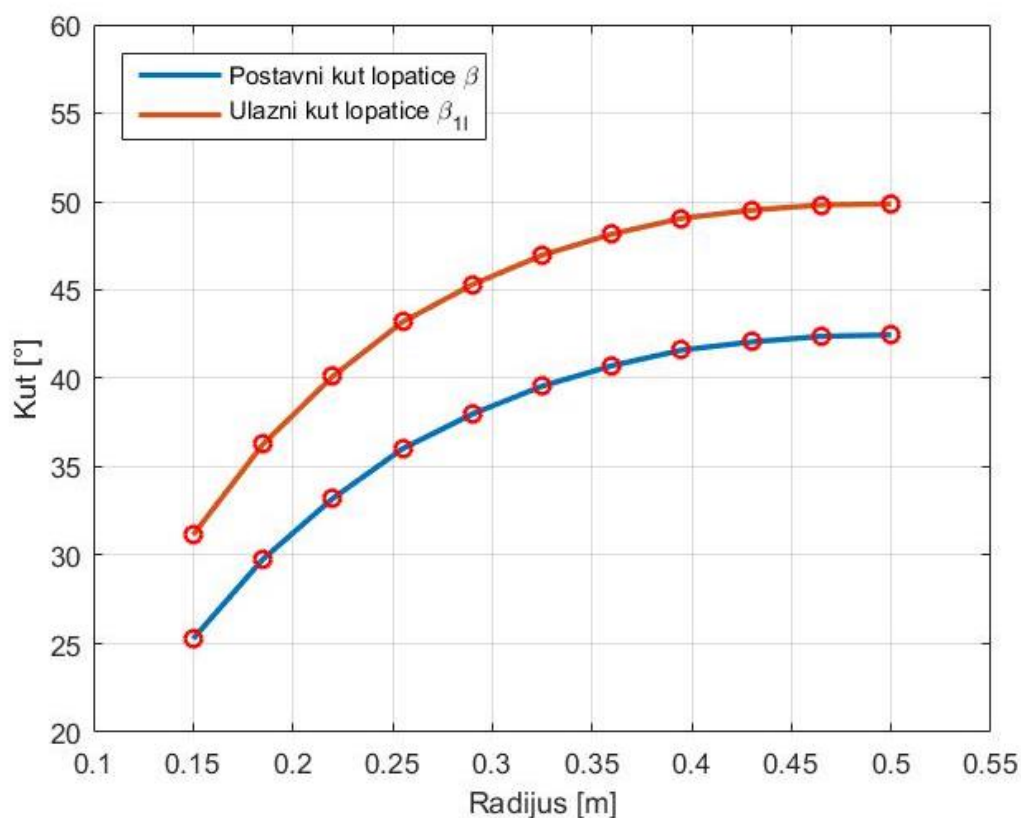
Treba primjetiti kako su za promatrani slučaj konstrukcije lopatice glavni parametri za zakretanje strujanja postavni kut β i kut zakreta lopatice $\Delta\beta_l$. Za odabrani NACA profil s kutom zakreta srednje linije od približno 11° do 15° po visini lopatice strujanje bi se zakrenulo čak i da je pod nultim napadnim kutom. Gledajući realan rotor to je lakše postići u korijenu lopatice gdje je strujanje sporije te je zato iznos δ pozitivan, odnosno postavni kut se povećava te posljedično napadni kut smanjuje. Napadni i postavni kut lopatice su u ovisnosti prema:

$$\alpha = \beta_1 - \beta. \quad (4.14)$$

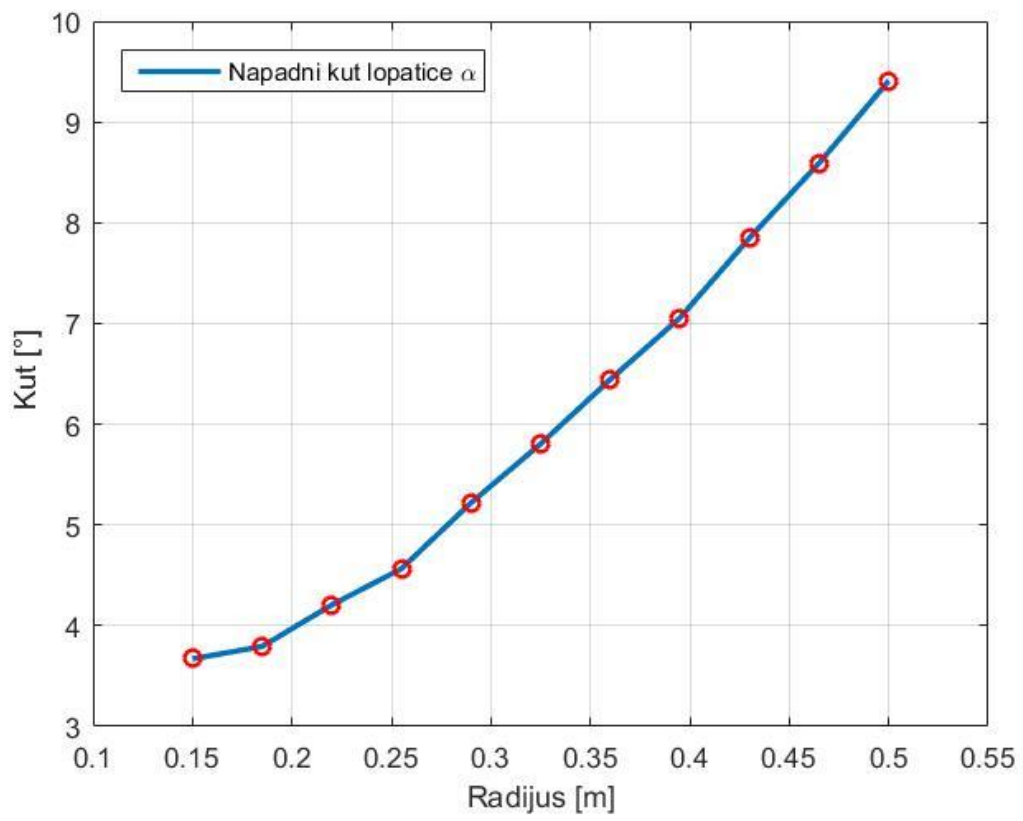
Kada se povećava radijus lopatice, raste i zakrivljenost lopatice, no također i brzina strujanja. Gledajući sliku 4.4 može se uočiti da korekcija kuta lopatice pri vrhu poprimi negativne vrijednosti.

To se događa radi utjecaja viskoznosti pri visokim brzinama gdje strujanje teže prati nametnuti smjer unatoč povećanju zakrivljenosti srednje linije. Taj utjecaj se povećava proporcionalno s povećavanjem radijusa promatranog segmenta, odnosno koraka rešetke.

Konstruktivski značaj toga je da će napadni kut lopatice rasti sve više od korijena prema vrhu da se postigne željeno zakretanje strujanja i samim time prirast tlaka. Na slici 4.5. prikazani su postavni kut β i ulazni kut lopatice β_{11} , gdje površina između njih predstavlja kut zakreta relativnog strujanja. Na slici 4.6. vidi se prikaz napadnog kuta α po visini lopatice. Vidljivo je da napadni kut na vrhu lopatice najveći i iznosi $\alpha_t = 9.42 [^\circ]$. Distribucija se smatra zadovoljavajućom s obzirom da ni na jednom dijelu lopatice ne dolazi do sloma uzgona. Porast napadnog kuta s porastom radijusa također izaziva veće opterećenje rotora na vrhovima lopatica što je i logično jer su upravo tamo veće brzine strujanja.



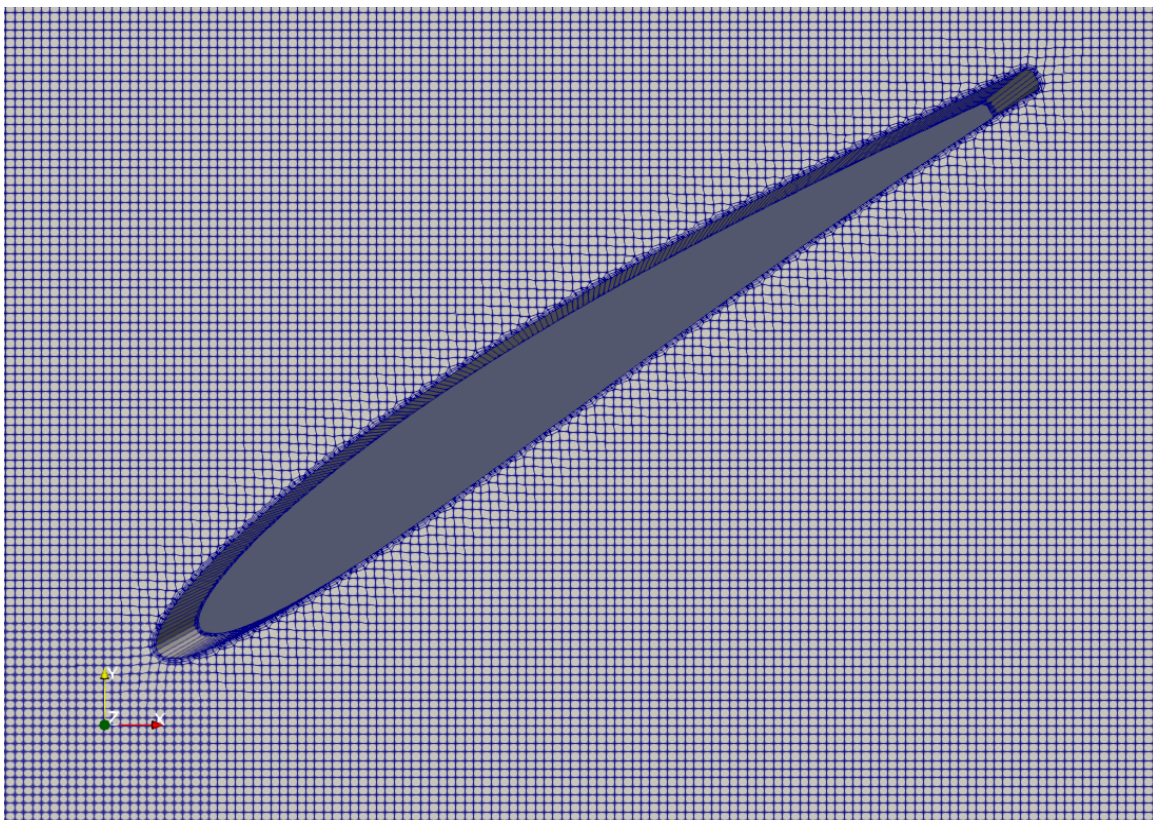
Slika 4.5. Postavni kut lopatice β i ulazni kut lopatice β_{11}



Slika 4.6. Napadni kut α

4.4. Izrada mreže i parametri simulacije

Po završetku izrade domene, konstruirana je 2D mreža od kvadratnih ćelija prikazana na slici uz unos veličine kvadratnih elementa. Postavljen je i tanki sloj elemenata oko aeroprofila kako bi se uzeo u obzir utjecaj graničnog sloja. Dio 2D mreže s aeroprofilom prikazan je na slici 4.7. Valja pojasniti, da iako se ovdje promatra 2D strujanje, radi prirode samog programskog paketa OpenFoam-a, geometrija za izradu mreže mora biti trodimenzionalna. To se rješava izradom ćelija u tri dimenzije, gdje je veličina domene u trećoj dimenziji debljine jednog kontrolnog volumena proizvoljnog iznosa. Stoga će se u nastavku na rubne uvjete referirati kao na plohe, a ne linije što bi bio slučaj u 2D geometriji.



Slika 4.7. 2D mreže u Paraview-u

Rubni uvjeti se zadaju za 4 vanjske plohe domene te za sam aeroprofil unutar domene. Na ulaznoj plohi zadaje se brzina po komponentama izračunatim prema jednadžbi (4.5), gdje v_1

odgovara brzini po osi x , dok u odgovara brzini u y smjeru, kako bi se dobio vektorski zbroj brzine w koja je relevantna za lopaticu.

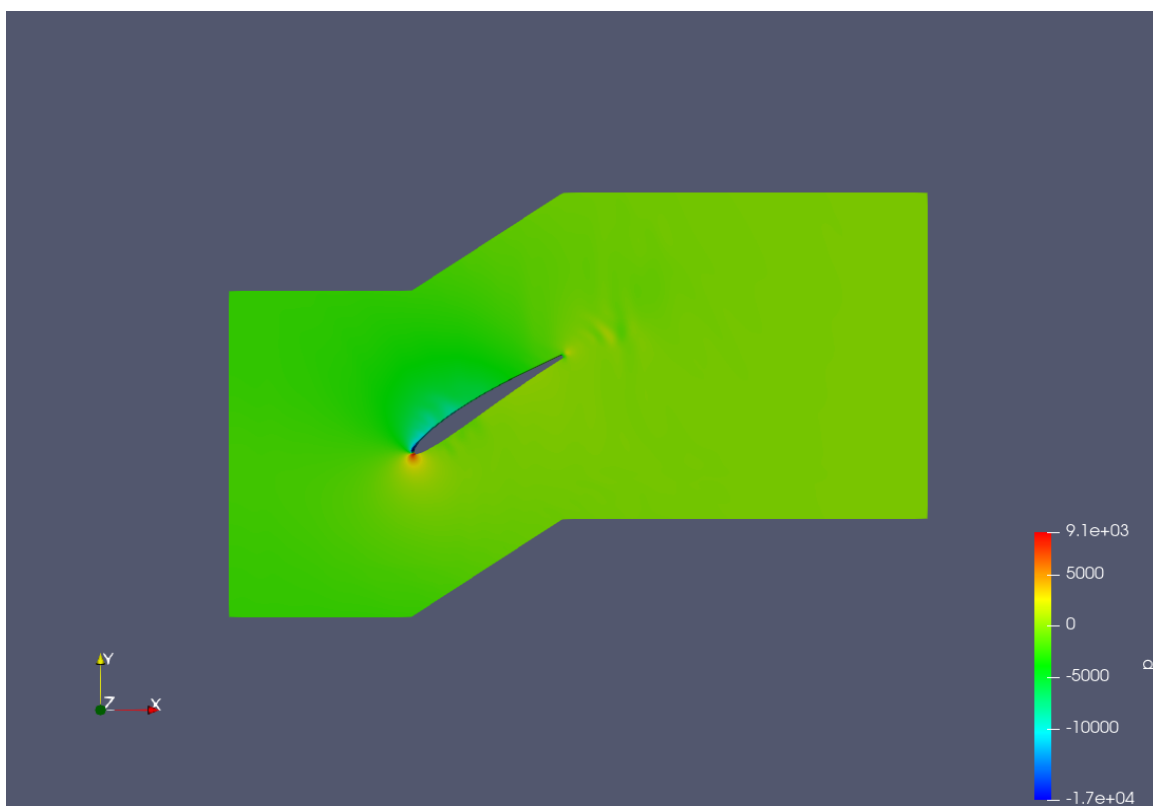
Radi stabilnosti rješenja, na izlaznoj plohi zadan je statički tlak od $p = 0$ [Pa]. Gornjoj i donjoj plohi domene dodijeljen je rubni uvjet *cycliAMI* (Arbitrary Mesh interface), koji spreže uvjete strujanja na odabranim plohama. U ovom slučaju to je ekvivalent peridičkom rubnom uvjetu korištenom u prvom koraku konstrukcije. Aeroprofil je modeliran kao zid, gdje je iznos brzine jednaka nuli. Iako je gustoća mreže držana konstantom, evidentno je da porastom radijusa po segmentima raste korak između lopaticu, pa posljedično rastu veličina domene i broj konačnih volumena u mreži.

Treba naglasiti da se ovdje strujanje promatra kao nestlačivo bez obzira što vrijednosti brzine pri vrhu lopatice prelaze vrijednosti Mahovog broja od $Ma = 0.3$. Promatranjem strujanja kao takvog opravdava se skraćivanjem vremena simulacija radi bržeg prikupljanja rezultata iterativnog procesa. Također valja istaknuti da je algoritam za rješavanje nestlačivog strujanja pouzdaniji u OpenFOAMu naspram stlačivog. Za rješavanje jednadžbi brzine i tlaka koristi se segregatni SIMPLE solver koji u pravilu konvergira unutar 1000 iteracija s relativnom tolerancijom reziduala od $1 \cdot 10^{-5}$. Za provedbu analize odabran je $k - \omega$ SST model, gdje SST predstavlja Shear Stress Transport. Odabrani model turbulencije je proširenje $k - \omega$ BSL modela, gdje BSL predstavlja Baseline. $k - \omega$ BSL model je nastao kombinacijom standardnog $k - \omega$ i $k - \varepsilon$ modela, gdje se $k - \omega$ model koristi uz čvrste stijenke dok se dalje od stijenke koristi $k - \varepsilon$ model. $k - \omega$ SST uzima navedena proširenja $k - \omega$ BSL uz dodatak modeliranja transporta turbulencije smičnog naprezanja definiranjem turbulentne viskoznosti. Radi sažetosti neće biti šire izložen, nego samo istaknuto da je odabran zato što je pogodan za širi raspon strujanja pogotovo kao što je strujanje oko aeroprofila [10].

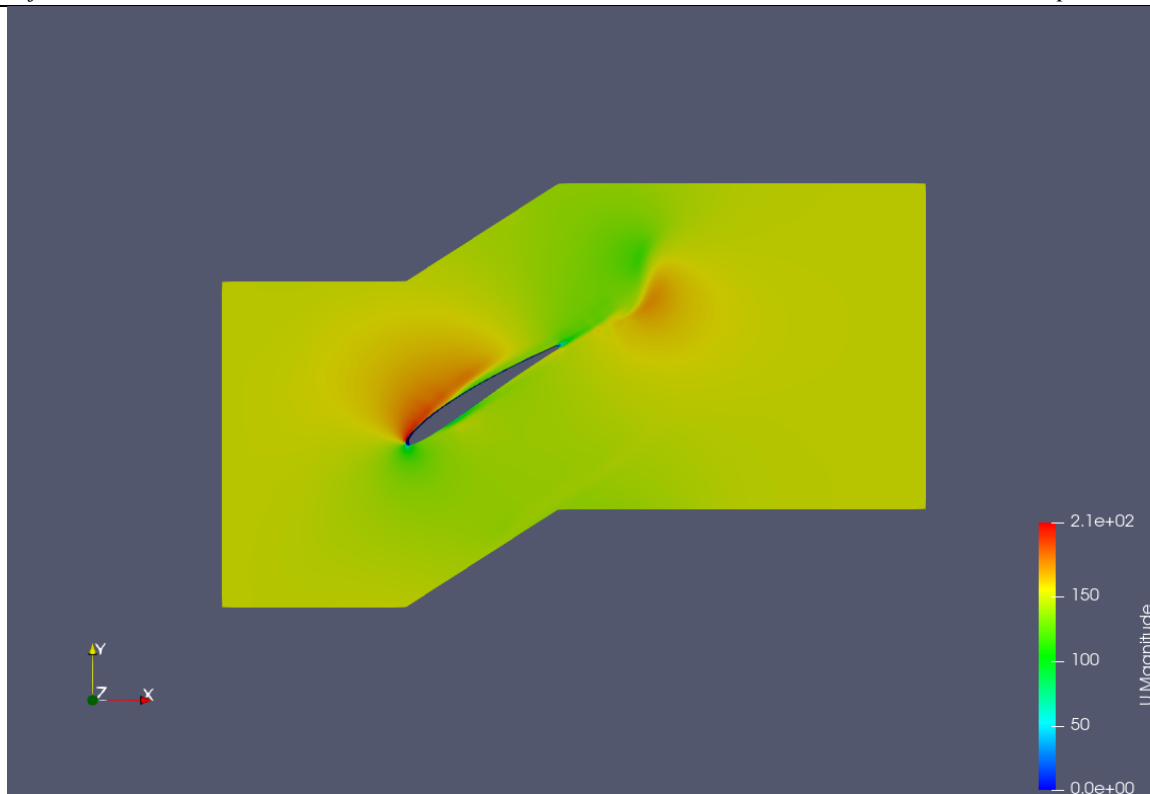
4.5. Prikaz rezultata

Prilikom izračuna aksijalne brzine, lopatica je podijeljena u 10 segmenata te će se zbog sažetosti rezultati strujanja prikazati za domenu na nasumičnom radijusu lopatice. Na slikama 4.8. i 4.9. je prikazana distribucija polja tlaka i brzine na 4. segmentu rotorske rešetke.

Po završetku konstrukcije rotorske rešetke po segmentima pomoću python skripte ispisana je tekstualna datoteka s koordinatama aeroprofila koja će se u idućem koraku implementirati pomoću programskog paketa za 3D oblikovanje SolidWorks.



Slika 4.8. Polje statičkog tlaka kroz 2D rotorsku rešetku



Slika 4.9. Distribucija brzine kroz 2D rotorsku rešetku

5. 3D ANALIZA TURBULENTNOG STRUJANJA

FLUENT

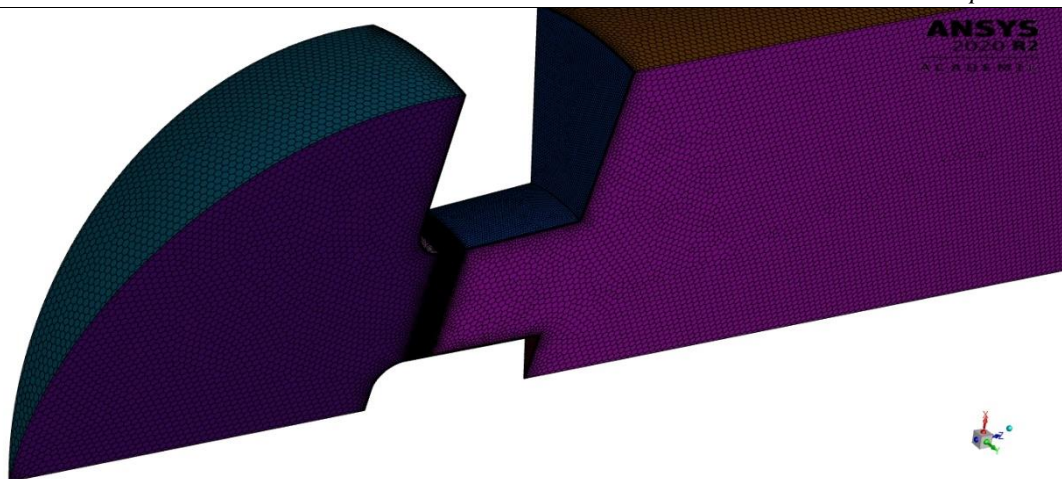
5.1. Izrada Geometrije

Nakon konstrukcije lopatice pomoću OpenFOAMa u prethodnom koraku, preostaje izvesti 3D simulaciju strujanja u Fluentu za validaciju rezultata potisne sile na lopatici rotora. Na početku je potrebno napraviti 3D geometriju domene koja je slična onoj u prvom koraku modeliranja uz razliku da se umjesto aktuatorskog diska sada implementira geometrija lopatice na 1/15 domene, tj. u periodičkom rasponu od 24° za razliku od prethodnog modela gdje raspon periodičke domene nije bio od značaja. Za konstrukciju modela koristi se ista 2D domena kao i u prvom koraku modeliranja te je prikazana na slici 3.5. Geometrija je izrađena u programskom paketu SolidWorks, učitavanjem krivulja za aeroprofile po segmentima te izrezivanjem dobivenog volumena lopatice iz domene strujanja.

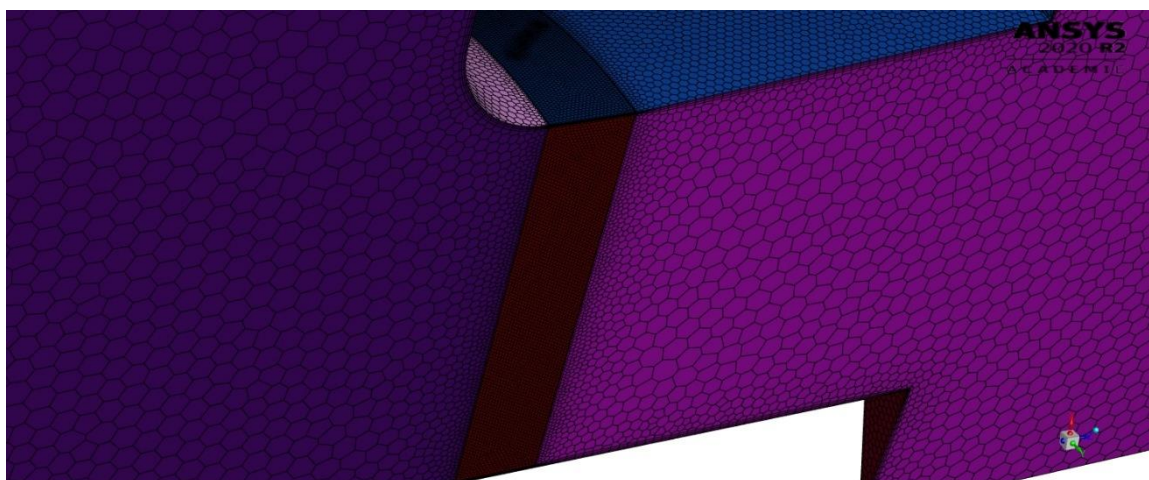
Geometrija je pripremljena na način da je domena podijeljena na 3 dijela: *ulaz*, *rotor* i *izlaz*. Za zonu rotora odabran je dio dužine 7 cm koji počinje točno iza ulazne usne rotora te završava na početku difuzora.

5.2. Izrada Mreže

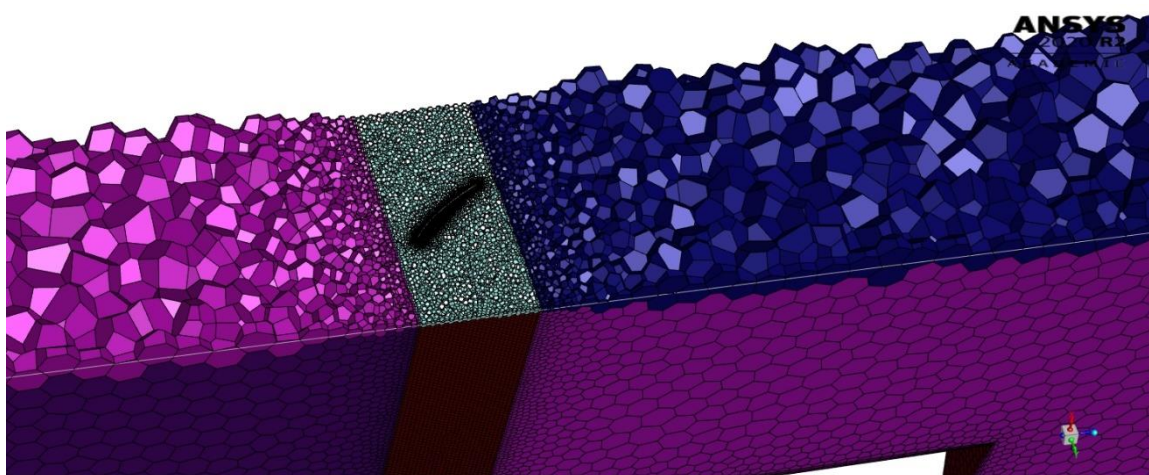
Za razliku od prethodne mreže u prvom koraku modeliranja, mreža ove domene s 3D lopaticom napravljena je u Fluentovom alatu za izradu mreže *Fluent Meshing*. Mreža je izrađena s pažnjom na gustoću konačnih volumena oko rotora gdje se pojavljuju najveći gradijenti tlaka i brzine da se taj utjecaj što točnije opiše. Prikaz vanjske površine mreže vidi se na slikama 5.1. i 5.2. Također je zadana i relativno mala lokalna zakrivljenost za lopaticu rotora kako bi konačni volumeni uspješno opisali promjenu postavnog kuta lopatice po visini lopatice. Preostaje nadodati da je umetnut i granični sloj na lopaticu i zidove kućišta debljine 3 sloja. Prikaz unutarnje mreže vidljiv je na slikama 5.3. i 5.4., gdje je vidljivo profinjenje mreže u području lopatice rotora. Uz navedene postavke, izrađena je poliedarska mreža s 1 252 606 konačnih volumena, od kojih 967 868 na *rotoru*, 70 961 na *ulazu* te 213 777 na *izlazu*.



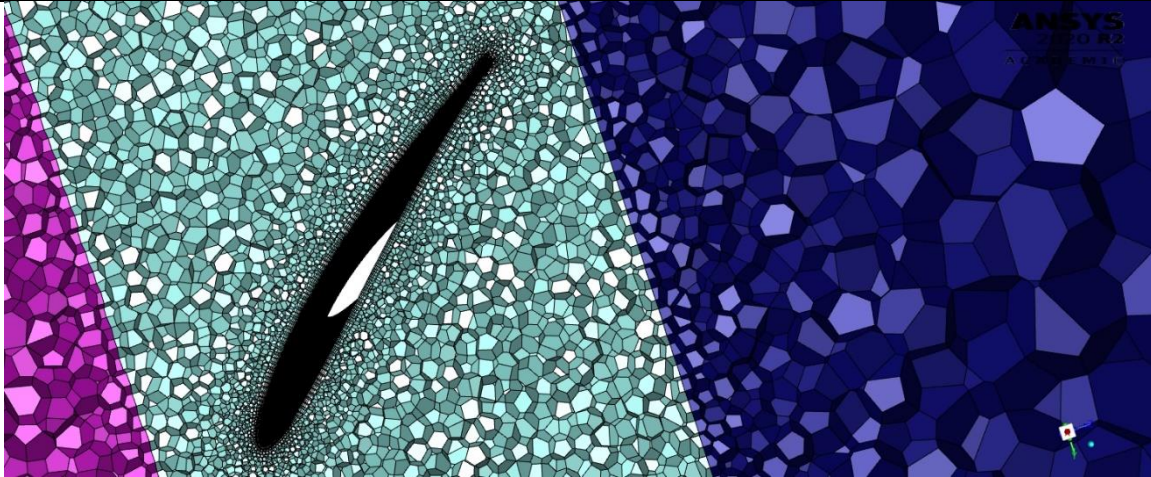
Slika 5.1. Diskretizacija vanjske površinske prostorne domene



Slika 5.2. Diskretizacija vanjske površinske prostorne domene, uvećani prikaz



Slika 5.3. Diskretizacija prostorne domene (mreža)



Slika 5.4. Diskretizacija prostorne domene (mreža) oko aeroprofila

5.3. Parametri simulacije

Za provedbu simulacije rotacije lopatice korišten je model rotirajućeg koordinatnog sustava za opis gibanja lopatice. Korišten je SRF pristup (Single Reference Frame) tj. samo jedan rotirajući koordinatni sustav. To je provedeno na način da se cijeloj domeni *rotora* dodijeli kutna brzina u iznosu od $\omega = 376 \text{ rad/s}$, dok su domene *ulaza* i *izlaza* ostale nepromijenjene u inercijskom koordinatnom sustavu. Strujanje se promatra kao stacionarno bez vremenskog člana u relevantnim jednadžbama. Nadalje, strujanje se promatra kao stlačivo s obzirom da iznosi brzine prelaze vrijednosti od 200 m/s što se smatra stlačivim područjem.

5.3.1. Rubni uvjeti

Rubni uvjeti su postavljeni slično kao i u prvom koraku modeliranja s *2 pressure inleta* na *ulazu* i dugačkom gornjem dijelu domene *izlaza* i *pressure outletom* na vertikalnom izlazu iz domene. Statički tlak na ulaznim dijelovima postavljen je nešto više od atmosferskog tlaka kako bi se potaknulo strujanje u očekivanom smjeru te iznosi $p = 10 \text{ Pa}$. Iznos statičkog tlaka na izlazu postavljen je na $p = 0 \text{ Pa}$, tj. jednak atmosferskom tlaku. Nadalje, s obzirom da se cijela domena *rotora* modelirala u rotacijskom koordinatnom sustavu, to znači da se i gornja ploha te domene također rotira, što ne bi trebao biti slučaj. To se korigira tako što se taj dio zida kućišta modelira kao pokretni zid s apsolutnom brzinom jednakom nuli. Uz to je odlučeno da se po uzoru na realan rotor dio glavčine ispred rotora također modelira kao pokretni (rotirajući) zid s rotacijskom brzinom jednakom onom na rotoru.

5.3.2 Matematički model strujanja fluida

Strujanje jednofaznog jednokomponentnog fluida se opisuje sustavom Navier-Stokes-ovih jednažbi. Ove jednažbe predstavljaju zakon očuvanja mase – ρ , količine gibanja – ρu_i , i energije – ρE . Sustav jednažbi napisan u sažetom matricnom konzervativnom obliku koji naglašava međusobnu povezanost pripadajućih jednažbi sustava prema:

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u_i \\ \rho E \end{bmatrix} + \frac{\partial}{\partial x_j} \begin{bmatrix} \rho u_j \\ \rho u_j u_i + p \delta_{ij} \\ \rho u_j h \end{bmatrix} - \frac{\partial}{\partial x_j} \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{ij} \\ \tau_{ij} u_j - q_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \rho f_i \\ W_f + S_E \end{bmatrix}, \quad (5.1)$$

gdje je entalpija označena s h , a totalna energija:

$$E = e + \frac{u_i u_i}{2}. \quad (5.2)$$

W_f je rad vanjskih masenih sila, S_e energetski izvori ili ponor, a f_i vanjska masena sila.

Da bi se sustav NS jednažbi riješio pridružene su mu konstitutivne relacije:

Generalizirani Newtonom zakon viskoznosti:

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (5.3)$$

Fourierov zakon toplinske vodljivosti:

$$q_i = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (5.4)$$

Termodinamičke jednažbe stanja:

$$p = p(\rho, T) \quad (5.5)$$

$$e = e(\rho, T) \quad (5.6)$$

Koeficijent dinamičke viskoznosti μ i koeficijent toplinske vodljivosti λ ovise o lokalnom termodinamičkom stanju fluida:

$$\mu = \mu(\rho, T) \quad (5.7)$$

$$\lambda = \lambda(\rho, T) \quad (5.8)$$

5.3.3. Opće postavke

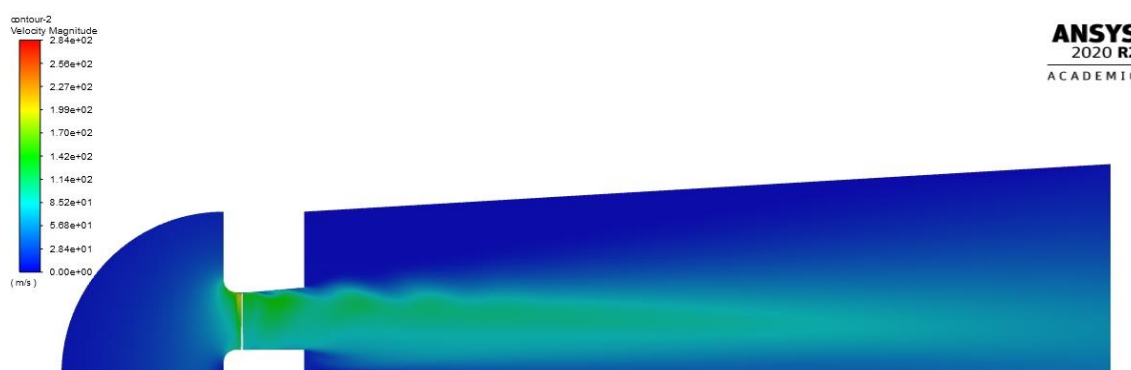
Iako je istaknuto kako se strujanje promatra kao stlačivo, radi skraćivanja vremena konvergencije rezultata, što je slučaj kod ove simulacije, strujanje će se prvo promatrati kao nestlačivo. Promatrajući strujanje kao nestlačivo isključuje se energetska jednadžba iz sustava jednadžbi 5.1. Na taj način se ubrzava rješavanje međusobno spregnutih Navier-Stokesovih jednadžbi. Prilikom navedenih uvjeta koristi se *pressure based* solver tj. solver gdje se polje brzine dobije iz momentne jednadžbe, a polje tlaka se dobije rješavanjem jednadžbe tlaka (ili korekcije tlaka) koja se dobije kombiniranjem jednadžbe kontinuiteta i momentne jednadžbe. Za spregu brzine i tlaka koristi se segregatni SIMPLE algoritam.

Nakon što je proračun iskonvergirao do iznosa reziduala od $r = 10^{-5}$, simulacija se zaustavlja te se mijenjaju postavke za proračun stlačivog strujanja. Uključuje se energetska jednadžba u sustav Navier-Stokes-ovih jednadžbi te se za model fluida odabire idealan plin. Za ovaj dio simulacije solver se mijenja u *density based*, gdje se polje brzine također dobiva iz momentne jednadžbe. Razlika je da se ovom slučaju polje gustoće dobiva iz jednadžbe kontinuiteta, dok se polje tlaka dobiva iz jednadžbe stanja idealnog plina. Model turbulencije u obje simulacije je postavljen kao $k - \omega$ SST.

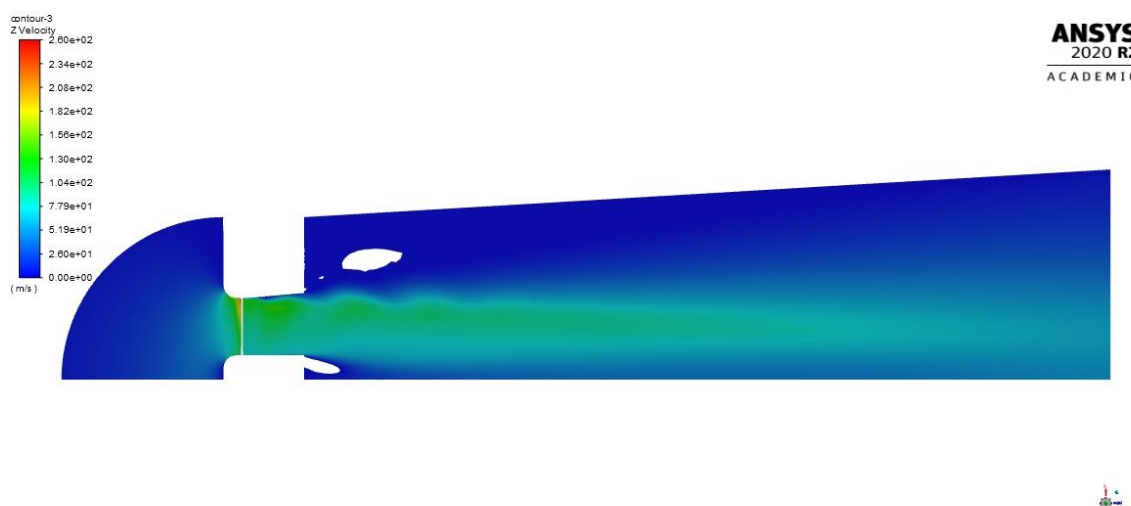
5.4. Prikaz i analiza rezultata

Radi lakšeg pregleda rezultata, konture relevantnih veličina date su na srednjoj meridijalnoj ravnini u 2D prikazu. Na slici 5.5. se vidi ukupan iznos brzine koji prati očekivani trend. Slika 5.6. prikazuje pozitivni iznos aksijalne brzine, gdje se vide prazni dijelovi domene iza glavčine i kućišta rotora koji ukazuju na recirkulaciju strujanja. Slika 5.7. daje uvećani prikaz aksijalne brzine u domeni rotora. Vidljivo je da aksijalna brzina na vršnom dijelu lopatice dolazi do iznosa od 260 m/s.

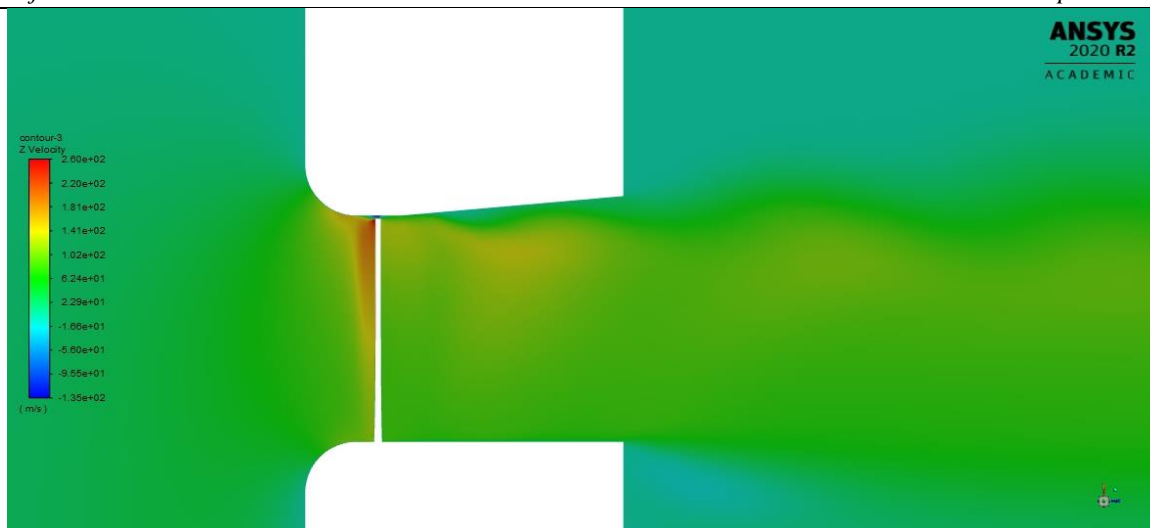
Iznos je veći od očekivanog po jednadžbi (4.5), radi promatranja strujanja kao stlačivog, kao i nailaska strujanja na zakrivljeni aeroprofil koji lokalno ubrzava strujanje. Također se može primijetiti negativna brzina na vrhu lopatice koja predstavlja zonu prestrujavanja s predtlačne na podtlačnu stranu lopatice.



Slika 5.5. Intenzitet vektora brzine u meridijalnoj ravnini



Slika 5.6. Aksijalna komponenta brzine

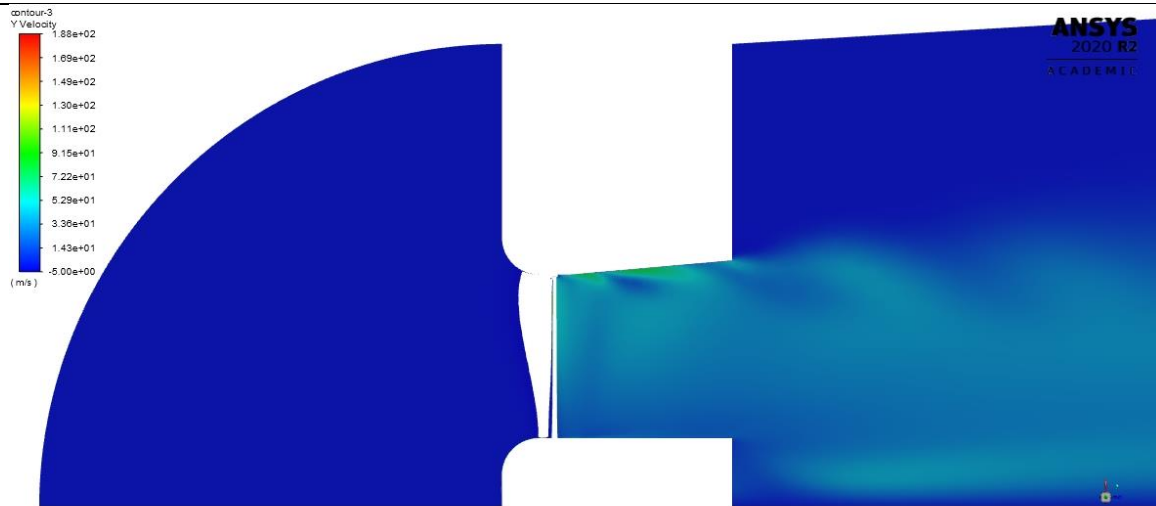


Slika 5.7. Aksijalna komponenta brzine na rotoru

Slika 5.8. prikazuje tangencijalnu raspodjelu brzine u domeni strujanja. Radi boljeg prikaza, slika 5.9. prikazuje strujanje za iznos tangencijalne brzine u rasponu od maksimuma do -5 m/s. Vidljivo je da je najveća netom iza lopatice te da opada kako se odmiče od rotora prema izlazu što je također u skladu s očekivanjima. Nadalje bijela površina netom prije rotora ukazuje na tangencijalnu brzinu u suprotnom smjeru, koja se pojavljuje kao reakcija na okretanje rotora.



Slika 5.8. Tangencijalna komponenta brzine



Slika 5.9. Tangencijalna komponenta brzine na rotoru

Slika 5.10. prikazuje raspodjelu radijalnu brzine u domeni strujanja za koju je vidljivo da je najveća na ulaznoj usni rotora kod vrha lopatice. Slika 5.11. prikazuje također cijelu domenu strujanja za radijalnu brzinu, no samo za negativne iznose. Radi prethodno definiranih koordinatnih osi, negativne vrijednosti odgovaraju smjeru brzine koja ulazi s gornje plohe u domenu strujanja. Vidljivo je da je granični uvjet *pressure inlet* pravilno odabran te da strujanje ulazi u domenu strujanja sve do dugačkog bijelog dijela koji predstavlja trag rotora gdje se tok radi rotacije širi i ide u suprotnom smjeru.



Slika 5.10. Radijalna komponenta brzine

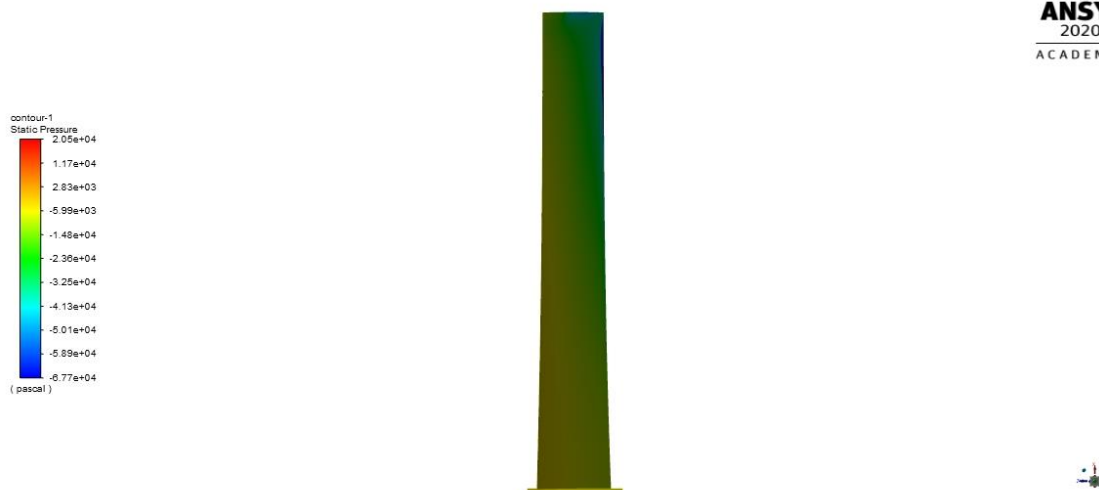


Slika 5.11. Radijalna komponenta brzine (raspon od max do -5 m/s)

Slika 5.12. prikazuje raspodjelu statičkog tlaka po domeni strujanja. Minimalne vrijednosti su upravo ispred lopatice rotora vidljive zeleno na slici. Slike 5.13. i 5.14. prikazuju raspodjelu tlaka na podtlačnoj i predtlačnoj strani lopatice. Također je jasno vidljiva razlika u iznosu tlaka koja je na natlačnoj strani uniformnija, dok na podtlačnoj strani raste od minimalnog iznosa plave boje prema zelenim i žutim većim vrijednostima. Slika 5.14. prikazuje zakret postavnog kuta lopatice iz pogleda od vrha lopatice prema korijenu. Također se vide i negativne vrijednosti tlaka na vrhu koje su još jedan indikator prestrujavanja strujanja s područja višeg tlaka u područje nižeg tlaka.



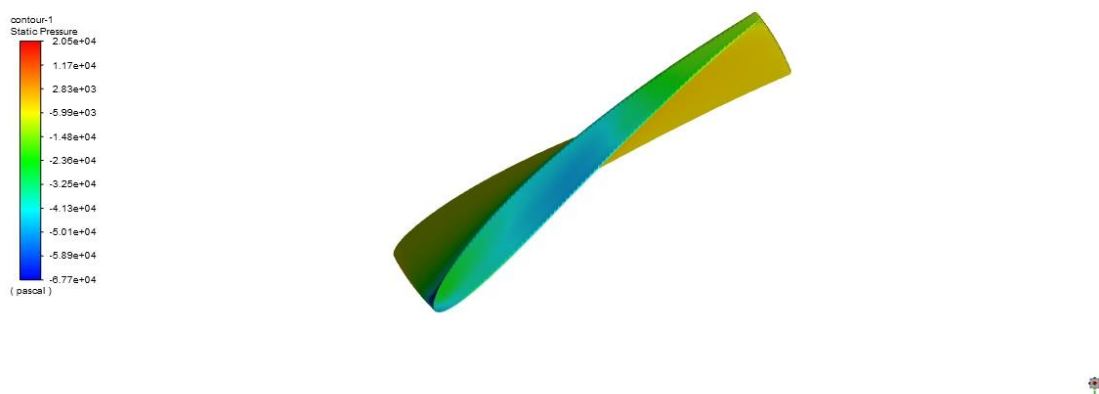
Slika 5.12. Polje statičkog tlaka u meridijalnoj ravnini



Slika 5.13. Podtlačna strana lopatice

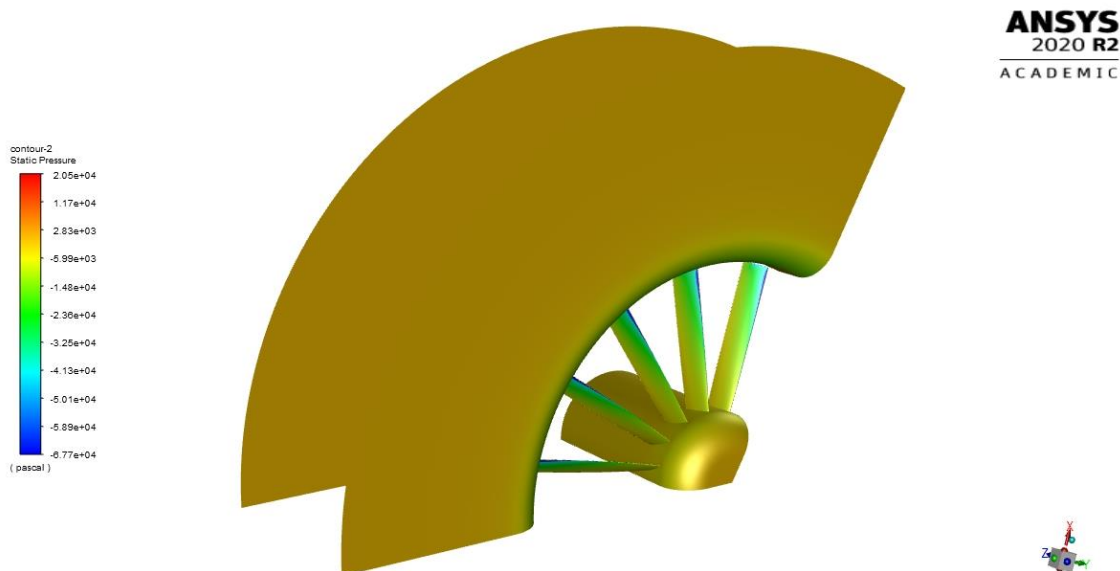


Slika 5.14. Predtlačna strana lopatice

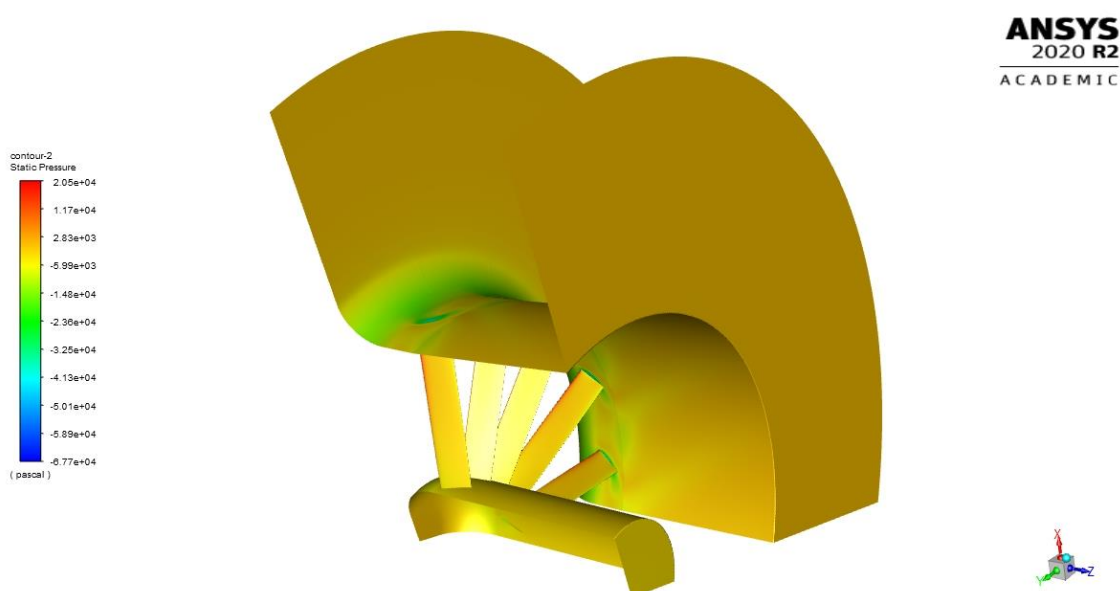


Slika 5.15. Lopatica - pogled s vrha

Slike 5.16. i 5.17. prikazuju 1/3 rotora s prednje i stražnje strane. Na slici 5.16 se vide podtlačne strane lopatica, a na slici 5.17. predtlačne strane. Treba napomenuti da se rotor okreće u smjeru kazaljke na satu gledajući referentno po slici 5.16.

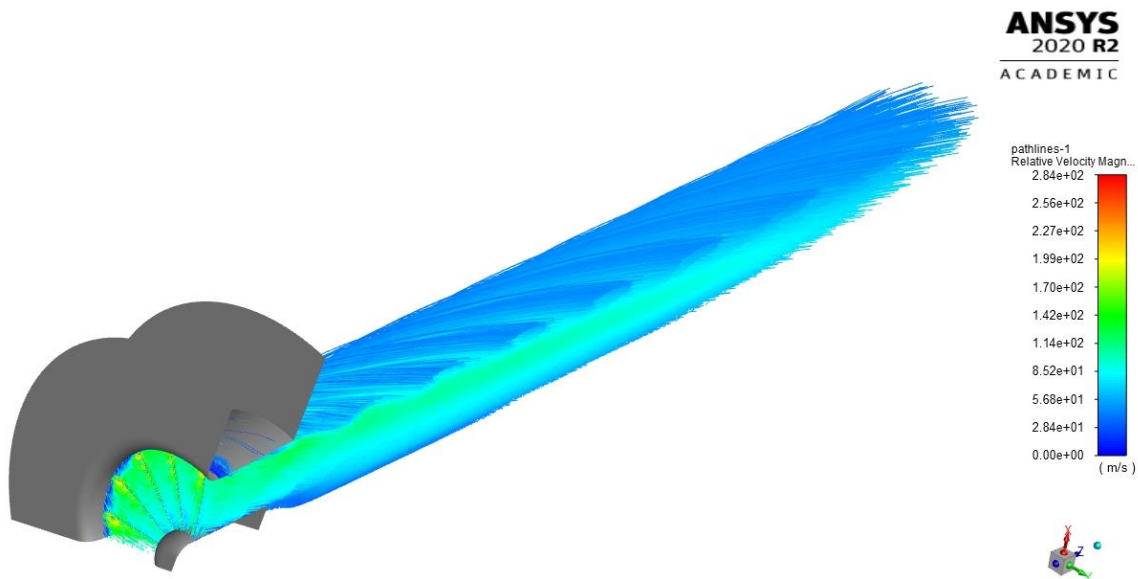


Slika 5.16. Statički tlak na 1/3 rotora s ulazne strane



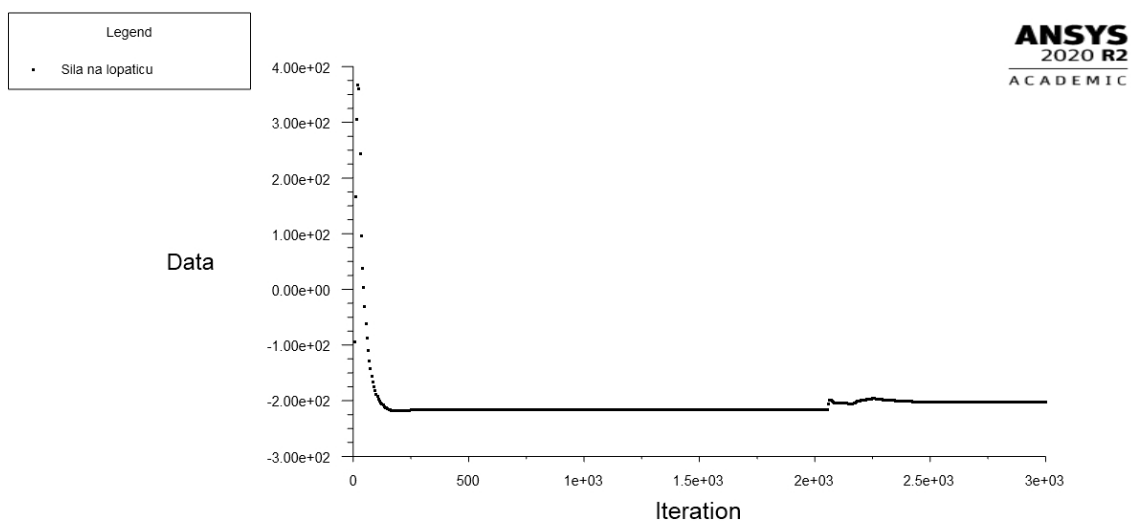
Slika 5.17. Statički tlak na 1/3 rotora s izlazne strane

Slika 5.18. prikazuje strujnice koje prolaze kroz ravninu rotora s relativnim iznosom brzine. Dobivena slika strujanja je u skladu s očekivanjima kretanja fluida.



Slika 5.18. Prikaz strujnica kroz ravninu rotora

Nakon analize strujanja preostaje odrediti silu na lopaticu koja provedbom simulacije stlačivog strujanja konvergira na vrijednost od 202 N. Pomnoživši tu vrijednost s brojem lopatica dobije se iznos potisne sile od ukupno 3030 N što je u granicama određene tolerancije. Dijagram konvergencije sile prikazan je na slici 5.19. te se pri broju iteracija od 2000 može vidjeti prelazak simulacije s nestlačivog na stlačivo strujanje.



Slika 5.19. Konvergencije sile

Treba napomenuti da izračunati maseni protok iznosi $Q = 5.678 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ za 1/15 domene odnosno $Q = 85.17 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ za cijelu domenu rotora. Ovaj je iznos za 6% manji od procijenjenog u prvom koraku što se objašnjava implementacijom 3D geometrije rotora u domenu, kao i činjenice da strujanje pri vrhu lopatice ide u suprotnom smjeru radi prestrujavanja fluida, što smanjuje vrijednost protoka. Valja istaknuti da bi se točan iznos tražene sile dobio u drugoj iteraciji na način da se smanji proračunska sila za razliku između tražene sile i sile dobivene u trenutnoj iteraciji.

6. ZAKLJUČAK

U okviru diplomskog rada prikaz je postupak za konstrukciju Fenestron rotora primjenom računalne mehanike fluida. Ulazna varijabla za proračun je potisna sila na repnom rotoru koja se dobije iz karakteristika glavnog rotora te dužine helikoptera. Utvrđeno je da geometrija rotora kvantitativno ovisi o veličini samog helikoptera, dok se promjenom oblika kućišta utječe na sliku strujanja koje se želi postići. Implementacijom ulazne usne na ulaznoj strani i difuzora na izlaznoj strani postiže se željeno povećanje masenog protoka radi lakšeg ostvarivanja tražene sile koristeći numerički model strujanja stlačivog fluida.

Prilikom konstruiranja lopatice po segmentima uspješno je ostvaren zadani prirast tlaka provođenjem simulacije strujanja nestlačivog fluida pritom držeći napadni kut lopatice ispod granice sloma uzgona što se smatra zadovoljavajućim.

U trećem dijelu simulacije je provjerena geometrija lopatice proračunom strujanja stlačivog fluida za dobiveni rotor te se ostvaruje zadana sila na lopatici koja iznosi nešto više od tražene, ali opet u 10% očekivanog odstupanja. Također je prikazano da se za rezultate strujanja nestlačivog fluida u trećem koraku dobije 10% veća potisna sila što je i očekivano s obzirom na prirodu strujanja.

Treba naglasiti da je promatrani 3D model rotora ograničen s obzirom da se ne promatra prestrujavanje fluida oko samog rotora te je zato i duljina kućišta proizvoljno dimenzionirana. S obzirom da je na izlaznoj ravnini rotora nametnut ulaz fluida putem graničnog uvjeta *pressure inlet*, taj utjecaj je zanemaren te samim time i sila na taj dio kućišta nije uzeta u obzir kod iznosa totalne sile.

Kada bi se promatralo prestrujavanje fluida oko rotora, mogla bi se dobiti sila na kućište koja doprinosi sili na lopatici te bi se posljedično smanjio broj lopatica, dužina tetive lopatice ili kolektivni kut lopatice da se postigne ista sila. Također, postoji prostor za optimizaciju konstrukcije kao npr. dodavanje statorskih lopatica, koja radi jednostavnosti nisu bile predmet ove analize.

7. LITERATURA

- [1] Novak D., Radišić T., Teorija leta helikoptera, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2012.
 - [2] EC130, slika, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:H_130_\(EC_130\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:H_130_(EC_130).jpg), 22.12.2020.
 - [3] EC145, slika, https://en.wikipedia.org/wiki/Eurocopter_EC145, 22.12.2020.
 - [4] EC 135, nacrt, <https://www.x-plane.com/adventures/ec135.html>, 22.12.2020.
 - [5] Vrdoljak, M., Osnove aerodinamike i mehanike leta helikoptera, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, Listopad 2017.
 - [6] Moutedre, E., Sudre, L., Dequin, A.M., D'Alascio, A., Haldenwang, P., Aerodynamic computations of isolated Fenestron® in hover conditions, Eurocopter, Aerodynamic Department,
 - [7] Hover and wind-tunnel testing of shrouded rotors for improved micro air vehicle design, University of Maryland, Department of Aerospace Engineering, 2008.
 - [8] Kampa, K., Enenkl, B., Polz, G., Rothr, G., Aeromechanic aspects in the design of the EC135, Eurocopter Deutschland GmbH, Minhen Njemačka
 - [9] Dixon, S.L., Hall, C.A.: Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery, Sixth Edition, Elsevierdirect, 2010.
 - [10] Ansys Fluent Theory Guide, Ansys Inc., Srpanj 2020.
-