

# ANALIZA UTJECAJA GEOMETRIJSKIH PARAMETARA NA STRUJANJE FLUIDA KROZ DARRIEUS VJETROTURBINU S VERTIKALNOM OSI

---

**Kolenc, Miroslav**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2024**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:089886>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-13**



*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Prijediplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**ANALIZA UTJECAJA GEOMETRIJSKIH PARAMETARA NA  
STRUJANJE FLUIDA KROZ DARRIEUS VJETROTURBINU S  
VERTIKALNOM OSI**

Rijeka, rujan 2024.

Miroslav Kolenc

0035204740

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Prijediplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**ANALIZA UTJECAJA GEOMETRIJSKIH PARAMETARA  
NA STRUJANJE FLUIDA KROZ DARRIEUS VJETROTURBINU  
S VERTIKALNOM OSI**

Mentor: Prof. dr. sc. Zoran Čarija

Rijeka, rujan 2024.

Miroslav Kolenc

0035204740

Rijeka, 12. ožujka 2021.

Zavod: **Zavod za mehaniku fluida i računalno inženjerstvo**  
Predmet: **Hidraulički strojevi**  
Grana: **2.15.04 mehanika fluida**

## ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Miroslav Kolenc (0035204740)**  
Studij: Sveučilišni prijediplomski studij strojarstva

Zadatak: **Analiza utjecaja geometrijskih parametara na strujanje fluida kroz Darrieus vjetroturbinu s vertikalnom osi**

### Opis zadatka:

Upotrebom dostupnih CAD alata potrebno je definirati 2D geometriju vjetroturbine s vertikalnom osi. Lopatice turbine definirati NACA profilom. Za tako definiran model vjetroturbine potrebno je generirati numeričku mrežu, pripremiti simulaciju i provesti numeričku analizu. Rad turbine potrebno je analizirati za različite geometrijske karakteristike. Proračunati rezultati moraju se dovesti u korelaciju s postojećim izvedbama te je nužno dati teoretski pregled građe i principa rada turbine.

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

Zadatak uručen pristupniku: 15. ožujka 2021.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:

---

prof. dr. sc. Zoran Čarija

---

prof. dr. sc. Kristian Lenić

## IZJAVA

Izjavljujem da sam završni rad izradio samostalno uz mentore prof. dr. sc Zorana Čariju i asist.dr. sc. Ivanu Lučin koristeći se njihovim savjetima, znanjima stečenim tijekom studija i navedenom literaturom.

## SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. TIPOVI VJETROTURBINA .....	2
2.1 Vjetroturbina s vodoravnom osi (HAWT) .....	2
2.1.1 Prednosti vjetroturbina s vodoravnom osi.....	4
2.1.2 Nedostaci vjetroturbina s horizontalnom osi.....	5
2.2. Vjetroturbine s vertikalnom osi (VAWT).....	6
3. DARRIEUSOVA VJETROTURBINA.....	9
3.1 Povijesni razvoj.....	10
3.2 Princip rada .....	12
3.3 Prednosti i nedostaci .....	14
4. IZRADA NUMERIČKE SIMULACIJE .....	15
4.1 Priprema simulacije .....	16
4.2 Numerička mreža .....	20
4.3 Ostali parametri simulacije .....	26
5. REZULTATI .....	29
ZAKLJUČAK.....	38
LITERATURA .....	39
POPIS SLIKA .....	41
POPIS TABLICA .....	43
SAŽETAK .....	44
SUMMARY .....	45

# 1. UVOD

U svijetu u kojemu je moderno govoriti o elektrifikaciji voznih parkova, potrebno je posvetiti i veliku pažnju izvorima električne energije potrebne za taj pokret. Prednost dajemo izvorima s minimalnim negativnim utjecajem na okoliš, izvorima bez štetnih ispušnih plinova, izvorima koji ne uništavaju staništa, izvorima koji direktno ili indirektno ne utječu na zdravlje čovjeka i prirode, izvorima koji nisu potencijalna sigurnosna prijetnja, izvorima koji ne ometaju slobodno gibanje čovjeka i životinja, izvorima kojih ima u obilje...

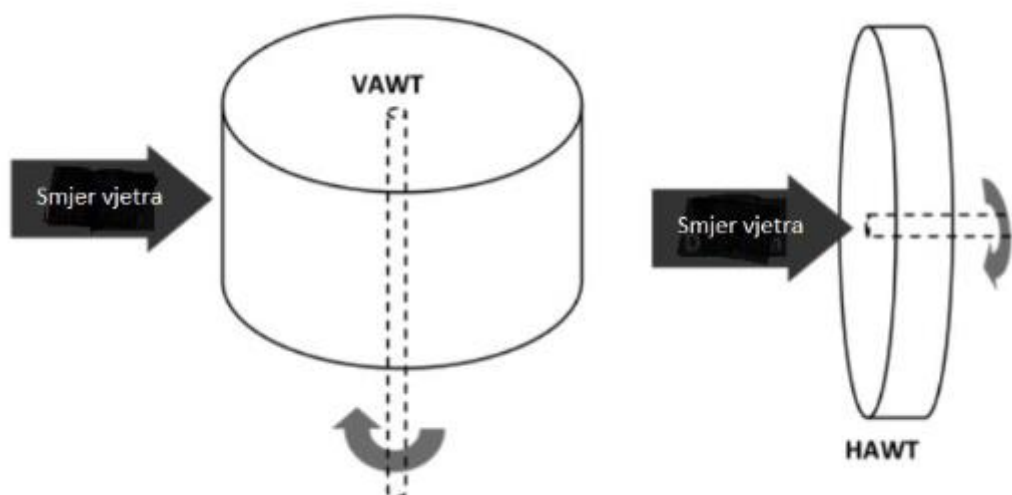
U marketinškim materijalima, jedno od najzastupljenijih rješenja tog problema su vjetroturbine. Ovaj rad će biti posvećen upravo njihovim brojnim oblicima, a kroz primjer jednostavne Darrieus vjetroturbine će biti prikazan princip i računalna simulacija njihovog rada.

Ovaj rad služi za upoznavanje osnovnih pojmova o vrstama i principu rada vjetroturbina te upoznavanje s programskim paketom Ansys Fluent na primjeru analize utjecaja geometrijskih parametara na strujanje fluida kroz Darrieus vjetroturbinu s vertikalnom osi.

U drugom poglavlju će biti dan pregled tipova vjetroturbina u komercijalnoj i eksperimentalnoj upotrebi s njihovim prednostima, nedostacima i okolišu u kojem rade. Treće oiglavlje govori o povijesnom razvoju, tipovima i principu rada Darrieusove vjetroturbine s vertikalnom osi. U četvrtom poglavlju se postavlja numerička simulacija H-Darrieusove vjetroturbine s 3 istovrsne jednako udaljene ravne lopatice u paketu računalnih paketa „Ansys“. Rezultati numeričke simulacije su prikazani u petom poglavlju.

## 2. TIPOVI VJETROTURBINA

Vjetroturbine se najčešće dijele po položaju osi vratila turbine na vjetroturbine s vodoravnom (eng. Horizontal Axis Wind Turbine - HAWT) i vjetroturbine s vertikalnom osi (eng. Vertical Axis Wind Turbine - VAWT) (slika 1.1). Vjetroturbine s vodoravnom osi su najzastupljenije i najviše istražene. Razvile su se u imponantne pojave karakterističnog izgleda s tri lopatice. S druge pak strane, vjetroturbine s okomitom osi dolaze u više različitih oblika, no ova vrsta je malo zastupljena i gotovo eksperimentalna u naravi. Razlozi tomu su relativno mala efikasnost u odnosu na vjetroturbine s horizontalnom osi te pojava problema u ranom razvoju od kojih vjetroturbine s horizontalnom osi nisu patile što im je omogućilo značajno bolje inicijalne rezultate te rezultiralo većim interesom i financijskom potporom. [4] Vjetroturbine s vertikalnom osi se još mogu podijeliti na Savoniusove (reakcijske) i Darrieusove (akcijske) vjetroturbine.



Slika 1.1 Podjela vjetroturbina s obzirom na položaj osi vratila [17]

### 2.1 Vjetroturbina s vodoravnom osi (HAWT)

Vjetroturbina s vodoravnom osi (slika 2.1) je najzastupljeniji i najviše istražen oblik vjetroturbine. Razvio se iz vjetrenjača koje su pogonile mlin za žito prikupljanjem energije vjetra na četiri lopatice koje su poput jedra, reaktivno hvatale silu vjetra kao otpor. Kasnije se otkrilo da je iskoristivost puno veća ukoliko se za pogon koristi sila uzgona te od tada sve vjetroturbine s vodoravnom osi koriste lopaticu nalik krilu aviona koje koriste silu uzgona za okretanje. [4]





Slika 2.1 *Tipična vjetroturbina s vodoravnom osi (fotografija autora)*

Po izvješću Globalnog vijeća za energiju vjetra (Global Wind Energy Council) u 2023. godini (slika 2.2) je u svijetu postavljeno novih vjetroelektrana ovog tipa s rekordnim kapacitetom snage od 117 GW što je porast od 50% naspram postavljenog kapaciteta prethodne godine. Procjenjuje se da ukupni postavljeni kapacitet iskorištavanja snage vjetra u 2023 godini iznosi 1 TW. Predviđa se da će do 2030. taj kapacitet iznositi 2.75 TW. [7]

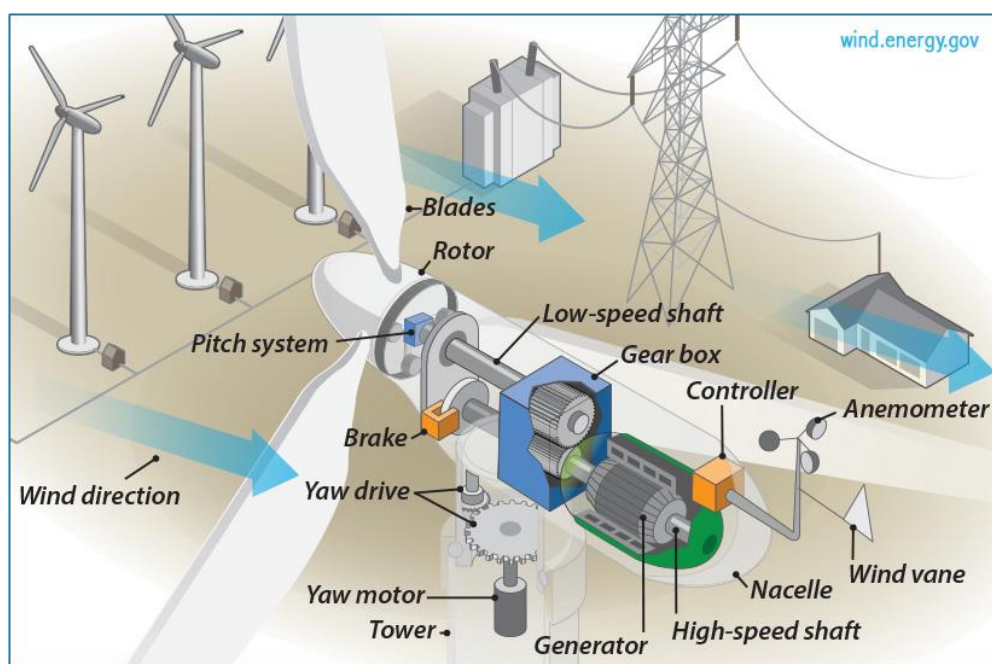


## 2.1.2 Nedostaci vjetroturbina s horizontalnom osi

Nedostaci vjetroturbine s horizontalnom osi su komplicirana izvedba lopatica, potreba za mehanizmom za zakretanje lopatica, potreba za mehanizmom za zakretanje vjetroturbine u vjetar te glasnoća. Budući da se brzina gibanja lopatice mijenja po njenoj duljini, od 0 m/s u osi rotacije do maksimalne brzine na vrhu, potrebno je varirati geometriju presjeka duž lopatice. Udaljavanjem od središta, presjek se stanjuje te mu se mijenja kut. Geometrija lopatice ovisi o uvjetima vjetra kojeg će vjetroturbina iskorištavati.

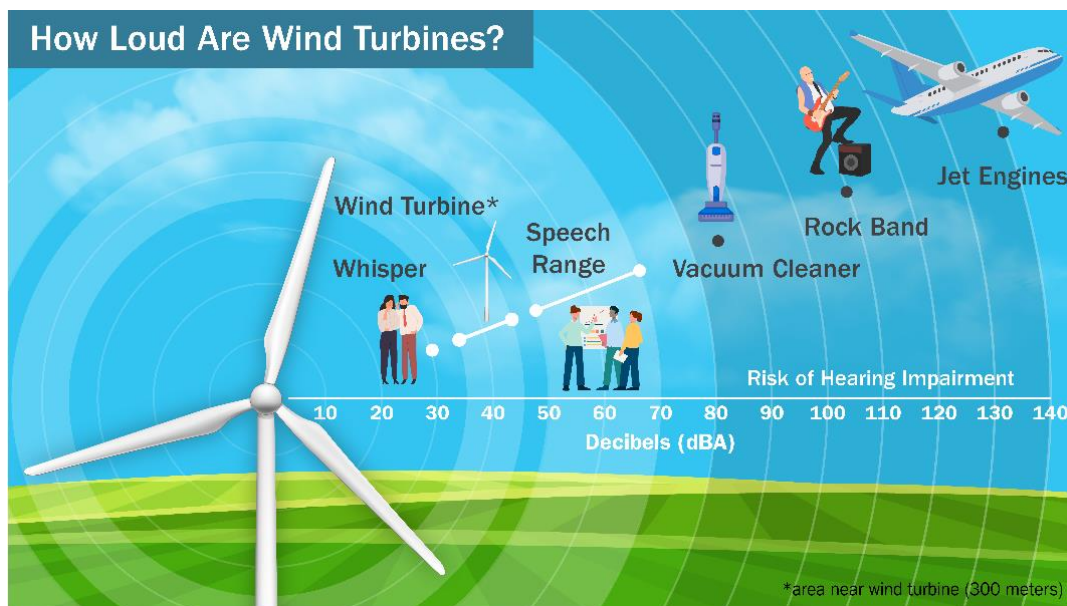
S obzirom da je vjetar prirodna pojava, nije konstantan. Za optimalno iskorištavanje njegove energije, potrebno je varirati kut cijele lopatice (eng. pitch) koristeći složeni mehanizam za zakretanje lopatica (slika 2.3). Također, u uvjetima jakog i olujnog vjetra koji nadilaze mogućnosti vjetroturbine, lopatice se postavljaju u neutralan kut pri kojem ne stvaraju uzgon te se rotor ne okreće čime se ne stvaraju sile koje bi oštetile ili uništile sklopove vjetroturbine. [3]

Vjetar ne mijenja samo iznos svoje brzine nego i smjer nasmjavanja. Vjetroturbine s horizontalnom osi su dizajnirane da rade kada im je os rotacije paralelna s vektorom brzine vjetra. Kako bi se to postiglo, vjetroturbine su opremljene mehanizmom za zakretanje koji usmjerava cijeli gornji dio vjetroturbine s rotorom, lopaticama, prigonom, generatorom i kućištem (eng. nacelle), a time i samu os rotacije (eng. yaw) u smjer vjetra. [3] Sustavi unutar kućišta su prikazani na slici 2.3.



Slika 2.3 Komponente vjetroturbine s vodoravnom osi [18]

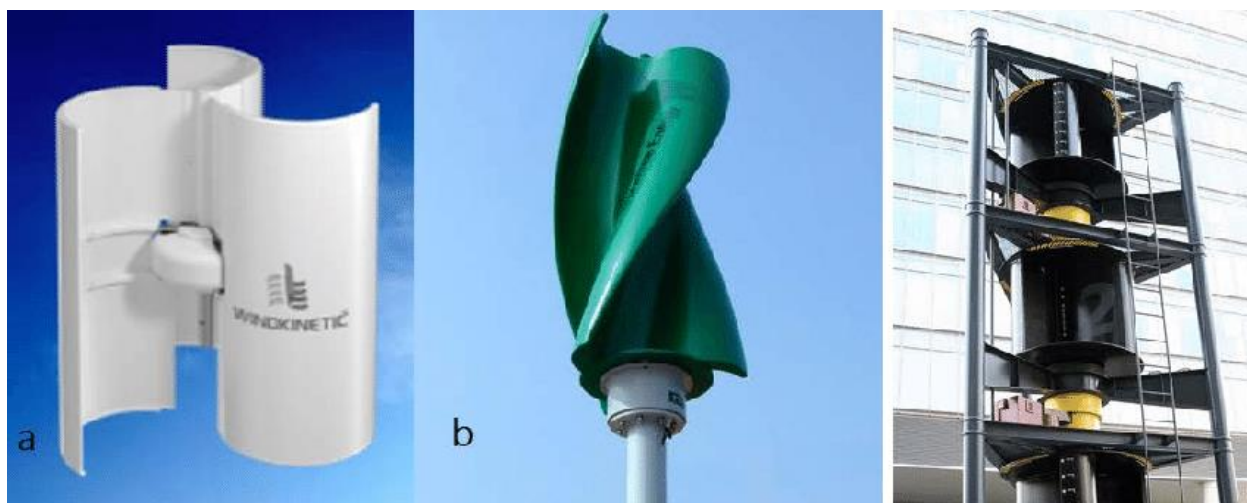
Iako zagovornici ističu da prosječne moderne vjetroturbine s horizontalnom osi proizvode samo 35-45 dBA buke, što je tiše od normalnog govora (slika 2.4) na minimalnoj očekivanoj udaljenosti naseljenih mjesta od vjetroelektrana od 300 m [6], buka se i dalje ističe kao mogući nedostatak.



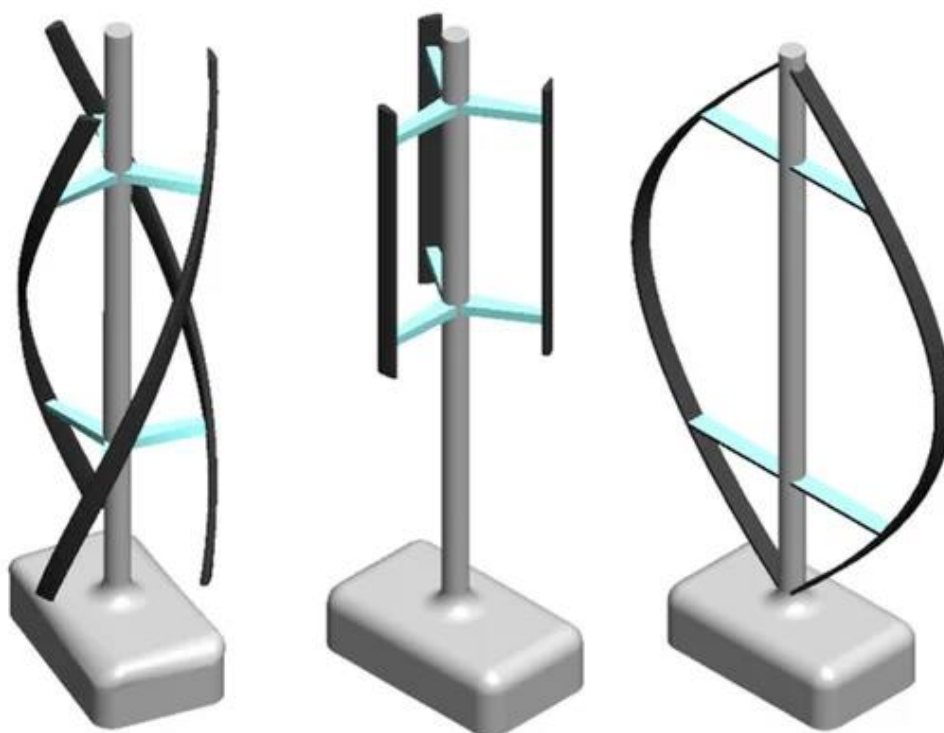
Slika 2.4 Vizualizacija glasnoće vjetroturbine u odnosu na ostale izvore zvuka [19]

## 2.2. Vjetroturbine s vertikalnom osi (VAWT)

U vjetroturbinama s vertikalnom osi, lopatice su posložene i rotiraju oko vertikalne osi. Neovisne su o smjeru puhanja vjetra, jer zbog vertikalne osi rotacije ne postoji nepovoljan smjer prilaza zračne struje. Vjetroturbine s vertikalnom osi nisu efikasne poput onih s horizontalnom osi, ali mogu biti jednostavnije u svojoj konstrukciji. Razlikujemo dva osnovna tipa: Savoniusove (reakcijske) i Darrieusove (akcijske). Savoniusove koriste reakcijsku silu otpora zraka za okretanje, a Darrieusove koriste silu uzgona. Darrieusove su stoga učinkovitije jer i lopatica u povratku, koja je udaljenija od smjera nastrujavanja vjetra, pridonosi stvaranju okretnog momenta na vratilu. U Darrieusovoj vjetroturbini s 2 lopatice, ta stražnja (eng. downwind) lopatica generira nezanemarivih 20% ukupne snage. [9] Maksimalna učinkovitost Savoniusove vjetroturbine je oko 18%, no uz upotrebu štitova povratne lopatice je moguće povećati učinkovitost na 27% uz značajno povećanje opterećenja na lopatice. Učinkovitost Darrieusove vjetroturbine je u rasponu od 30 do 40% [11]



Slika 2.5 Neke izvedbe Savoniusove vjetroturbine [3]



Slika 2.6 Neke izvedbe Darrieusove vjetroturbine [15]

Vjetroturbine s vertikalnom osi su popularno rješenje za urbane sredine s turbulentnim vjetrom te za samoodrživa (eng. offgrid) kućanstva. Prednost u urbanim sredinama imaju Savoniusove vjetroturbine zbog povoljnijih performansi u uvjetima slabog i turbulentnog vjetra karakterističnog za urbanu sredinu. Nazivna izlazna snaga Savoniusove vjetroturbine ne prelazi 10 kW, a Darrieusove se mogu komercijalno pronaći sa nazivnim snagama od 0,5 kW do 1,5 MW [2].

Prednosti vjetroturbina s vertikalnom osi:

- Zahtijevaju manje prostora i lakše ih je uklopiti u urbanu sredinu [2]
- Generator za pretvorbu mehaničke u električnu energiju i njegov prigon su postavljeni na tlu što smanjuje opterećenje konstrukcije, a time i cijenu izrade [2]
- Zbog jednostavne konstrukcije moguća je mobilna izvedba [11]
- Relativno lako održavanje u odnosu na vjetroturbine s vodoravnom osi kod kojih su generator, prigon i ostali mehanički sklopovi u kućištu na velikoj visini [3]
- Nije im potreban mehanizam za usmjeravanje u vjetar jer su neovisni o smjeru nastrujavanja vjetra [11]
- Manja buka u odnosu na vjetroturbine s horizontalnom osi zbog jednolike brzine strujanja zraka cijelom dužinom lopatice [2]
- Manja minimalna udaljenost između dvije vjetroturbine ovog tipa budući da istraživanja pokazuju da vrtloženja s turbine uz vjetar pozitivno utječu na vjetroturbinu niz vjetar [2]

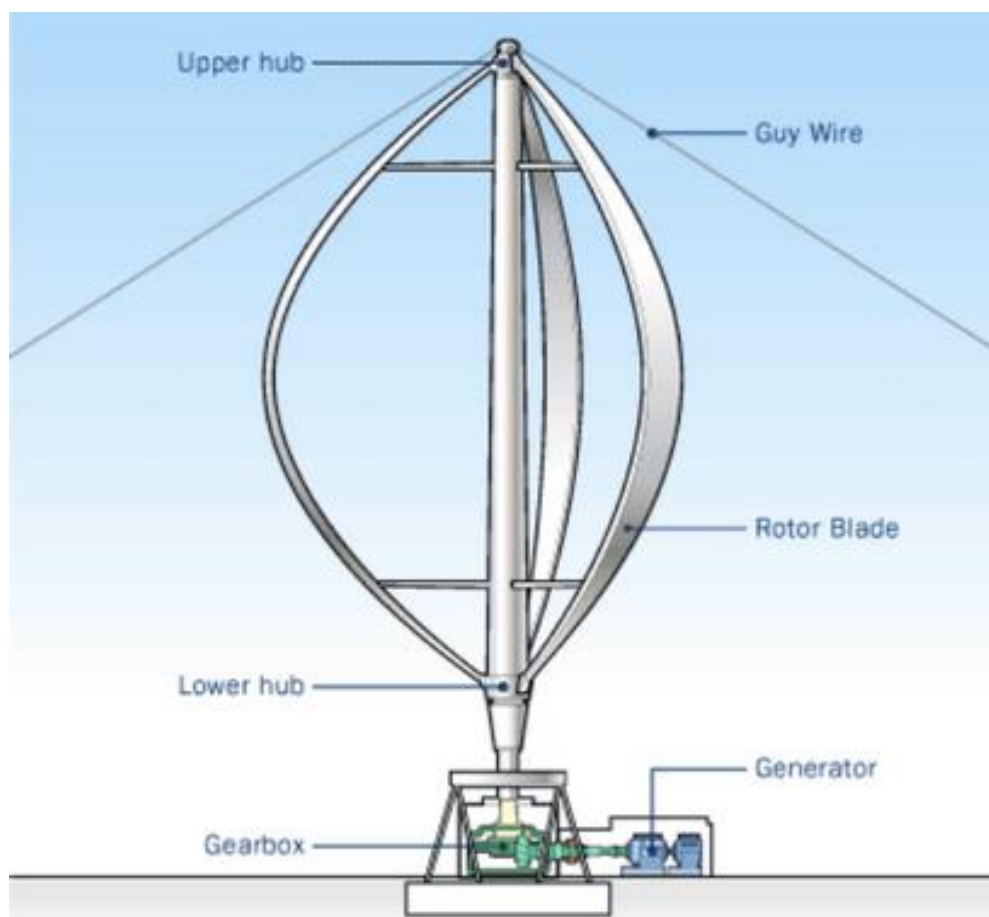
Nedostaci vjetroturbina s vertikalnom osi:

- Mala učinkovitost. Komercijalne Savoniusove imaju učinkovitost ispod 20%, Darrieusove 30-40%, a komercijalne vjetroturbine s horizontalnom osi 40-50% [11]
- Uz to što imaju malu učinkovitost, njihova snaga je dodatno ograničena time što iskorištavaju vjetar manje energije. Snaga vjetroturbine ovisi o brzini vjetra na treću potenciju (izraz 2.1). Brzine vjetra pri tlu su manje nego na visinama na kojima ih iskorištavaju vjetroturbine s horizontalnom osi [9]
- Veliko opterećenje aksijalnog ležaja na dnu koji nosi masu cijele vjetroturbine [2]
- Ovakve vjetroturbine proizvode nekonstantan okretni moment budući da se konstantno mijenja kut nastrujavanja vjetra na lopatice kako se okreće vjetroturbina. Ovaj problem je moguće riješiti povećanjem broja lopatica ili korištenjem složenijih zavojitih izvedbi lopatica pri kojoj sljedeća lopatica ulazi u zahvat prije nego što ga prethodna napušta. [9]



### 3. DARRIEUSOVA VJETROTURBINA

Darrieus vjetroturbina je grupni naziv za vjetroturbine s vertikalnom osi koje rade na principu uzgona. Razlikujemo one sa zakrivljenim i ravnim lopaticama. Vjetroturbine sa zakrivljenim lopaticama zbog svog oblika se također nazivaju i  $\Phi$ -Darrieus turbinama (slika 3.1), a budući da su prve izumljene, često se nazivaju pravim ili samo Darrieus turbinama.



Slika 3.1  $\Phi$ -Darrieus vjetroturbina [16]

Najučestalija vjetroturbina s vertikalnom osi s ravnim lopaticama je H-Darrieus također poznata kao Giromill vjetroturbina. Lopatice ove vjetroturbine su jednostavne ekstruzije aero profila što olakšava izgradnju i montažu (slika 3.2).



Slika 3.2 *H-Darrieus* vjetroturbina [1]

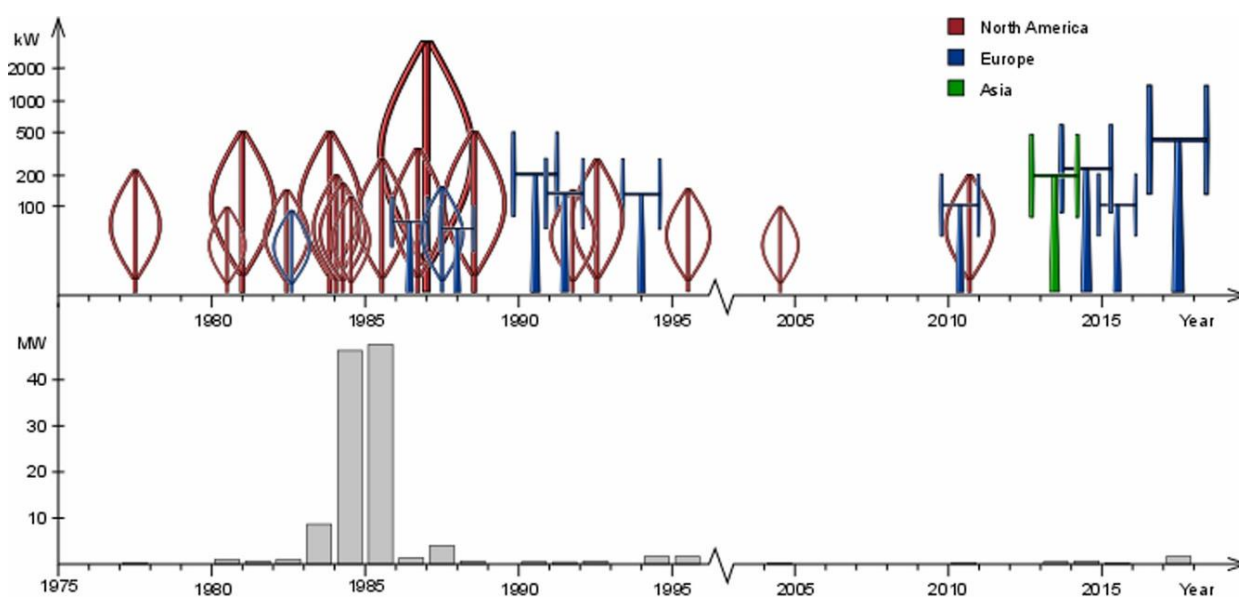
### 3.1 Povijesni razvoj

Georges Jean Marie Darrieus, francuski zrakoplovni inženjer, je 1925. godine izumio vjetroturbinu s vertikalnom osi koja koristi silu uzgona za pokretanje lopatica. Darrieus je 1931. svoj izum patentirao u Sjedinjenim Američkim Državama. Darrieus je proizveo niz minijaturnih vjetrotubina sa zakrivljenim i ravnim lopaticama, no za prve vjetroturbine ovog tipa koje su bile spojene na generator i proizvodile električnu energiju je zaslužan drugi Francuz, Jean-Baptiste Morel. Morel je 50-ih godina prošlog stoljeća, na jugu Francuske, izradio niz vertikalnih vjetroturbina s ravnim lopaticama od kojih je najveća imala snagu 7 kW. [4]

Darrieusova vjetroturbina je ponovo izumljena u Kanadi sredinom 60-ih godina. Peter South, Raj Rangi i Jack Templin su istraživali vjetroturbine s vertikalnom osi na Nacionalnom istraživačkom vijeću Kanade (eng. National Research Council of Canada - CNRC) te su o Darrieusovom patentu saznali tek kad su krenuli prijavljivati vlastiti. Njihovo istraživanje je nastavljeno do 1990-ih. U istraživanju im se početkom 70-ih, na poticaj Ministarstva energije Sjedinjenih Američkih Država (eng. US Department of Energy - DOE), pridružila Sandia (Sandia National Laboratories). [4]



Naftna kriza 70-ih i 80-ih je potakla niz ovakvih istraživanja obnovljivih izvora koji bi mogli smanjiti utjecaj uvozne nafte na ekonomsku stabilnost. Prvotni prototipovi sa lopaticama izrađenim iz aluminijskih legura su bili pogođeni velikim problemima sa zamorom što je uzrokovalo neprihvatljivo kratak životni vijek. Također, zamoru materijala su pridonijele i prvotno testirane izvedbe  $\Phi$ -Darrieus i H-Darrieus vjetroturbina koje su imale samo dvije lopatice koje su proizvodile velika ciklička dinamička opterećenja. Za vrijeme kojima je istraživačima bilo potrebno da riješe te probleme, istraživanja vjetroturbina s horizontalnom osi su puno više napredovala te time stekla veću popularnost i financijsku podršku javnih i privatnih investitora. Vjetroturbine s horizontalnom osi su stoga puno više napredovale i stekle puno veću komercijalnu primjenu, dok su vjetroturbine s vertikalnom osi marginalizirane i prisutne tek u posebnim namjenama. [4]

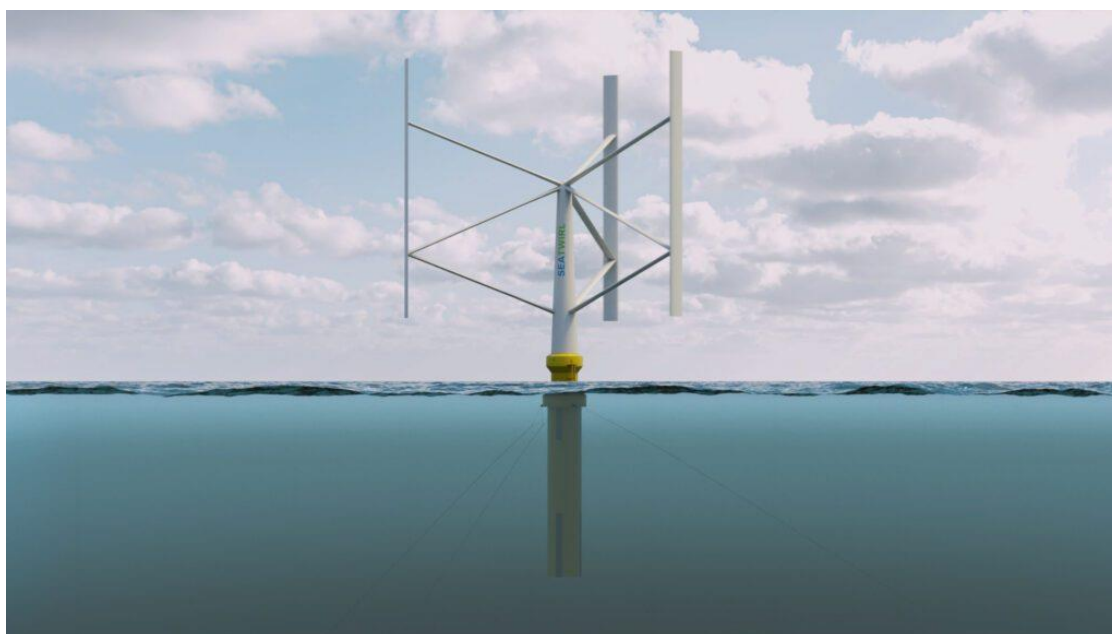


Slika 3.3 Darrieusove vjetroturbine preko 100 kW u svijetu kroz povijest [4]

Na gornjem dijelu slike 3.3 su prikazane značajne Darrieus vjetroturbine snage preko 100 kW. Istraživanja vjetroturbina s vertikalnom osi preko 100 kW u Sjevernoj Americi su davala prednost  $\Phi$ -Darrieus turbinama, a istraživanja u Europi i Aziji H-Darrieus turbinama. Na donjem dijelu slike 3.3 je prikazan ukupni instalirani kapacitet Darrieus vjetroturbina snage preko 100 kW. Može se zaključiti intenzivni razvoj sredinom 80-ih te pojava ponovnog interesa u proteklom desetljeću. Veliki dio novog interesa polazi iz ideje plutajućih vjetroturbina. Darrieusove vjetroturbine imaju značajnu prednost u ovoj primjeni nad turbinama s horizontalnom osi zbog

niskog položaja teških komponenti što rezultira niskim centrom mase koji omogućava jednostavnu konstrukciju stabilnih plutajućih vjetroturbinu u zahtjevnim uvjetima otvorenog mora. [4]

SeaTwirl je švedska kompanija koja nudi komercijalne plutajuće Darrieusove vjetroturbinu za primjenu u dubokom moru prikazane na slici 3.4. Kao prednosti ističu prikupljanje snage vjetrova većeg potencijala u odnosu na one koji se pojavljuju na kopnu, te činjenicu da je zbog ogromne površine otvorenog mora lako pronaći lokacije na kojima ne dolazi do konflikata sa drugim industrijama. Ova kompanija od 2015. u moru u blizini švedskog grada Lysekila testira plutajuću Darrieusovu vjetroturbinu snage 30 kW dizajniranu za vjetrove brzine do 17 m/s. Trenutno razvijaju vjetroturbinu snage 4-6 MW sposobne podnijeti ekstremne vjetrove brzine od 50 m/s, uz udare do 70 m/s. Ova vjetroturbina, SeaTwirl S3, je visoka 127 metara iznad linije mora, s lopaticama dugim 102 metra i promjerom rotora 127 metara. Offshore vjetroturbinu s horizontalnom osi, koje nudi Siemens Gamesa su u rasponu od 8-14 MW, no postavljaju se na morsko dno i time su ograničena na relativno plitka mora. [10]

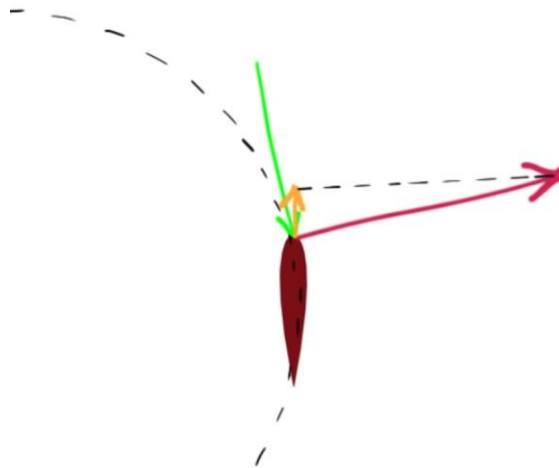


Slika 3.4 Plutajuća H-Darrieus vjetroturbina [10]

### 3.2 Princip rada

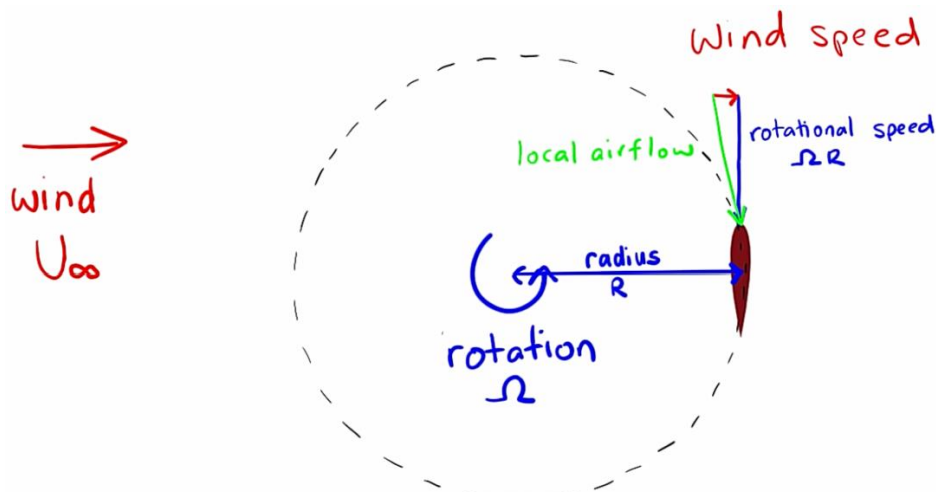
Na slici 3.5 je prikazan princip rada Darrieusove vjetroturbinu. Strujanjem zraka preko lopatice stvara se sila uzgona, označena crvenom bojom, okomita na vektor struje zraka označen zelenom bojom. Vektor sile uzgona se može rastaviti na vektore koji djeluju tangencijalno i

radijalno na kružnicu kojom se giba lopatica. Tangencijalna komponenta te sile, označena žutom bojom, je zaslužna za okretanje rotora.



Slika 3.5 Plan sila na lopaticu [14]

Na slici 3.6 je prikazano kako se smjer nstrujavanja zraka razlikuje od smjera puhanja vjetra. Lokalni vektor brzine zraka, označen zelenom bojom, koji prolazi lopaticom je rezultat zbroja vektora brzine vjetra, označenog crvenom bojom, i negativnog vektora obodne brzine lopatice, označen plavom bojom.



Slika 3.6 Pojava lokalnog vektora brzine zraka [14]

Ako smatramo kutnu brzinu vrtnje rotora konstantnom, lokalni vektor brzine zraka je ovisan o položaju lopatice te se mijenja s vremenom, budući da se s pomakom lopatice po kružnoj putanji mijenja i vektor brzine vjetra. Promjena lokalnog vektora brzine zraka rezultira variranjem

iznosa komponente sile na lopaticu koja stvara moment u vratilu što uzrokuje neravnomjeran rad vjetroturbine karakterističan za vjetroturbine s vertikalnom osi.

### 3.3 Prednosti i nedostaci

Uz prednosti i nedostatke navedene u poglavlju 2.2 koji se odnose na širok pojam vjetroturbina s vertikalnom osi, pa tako i Darrieusove vjetroturbine, one imaju i svoj niz prednosti i nedostataka koji ih razdvajaju od ostalih tipova vjetroturbina s vertikalnom osi.

Prednosti nad ostalim vjetroturbinama s vertikalnom osi:

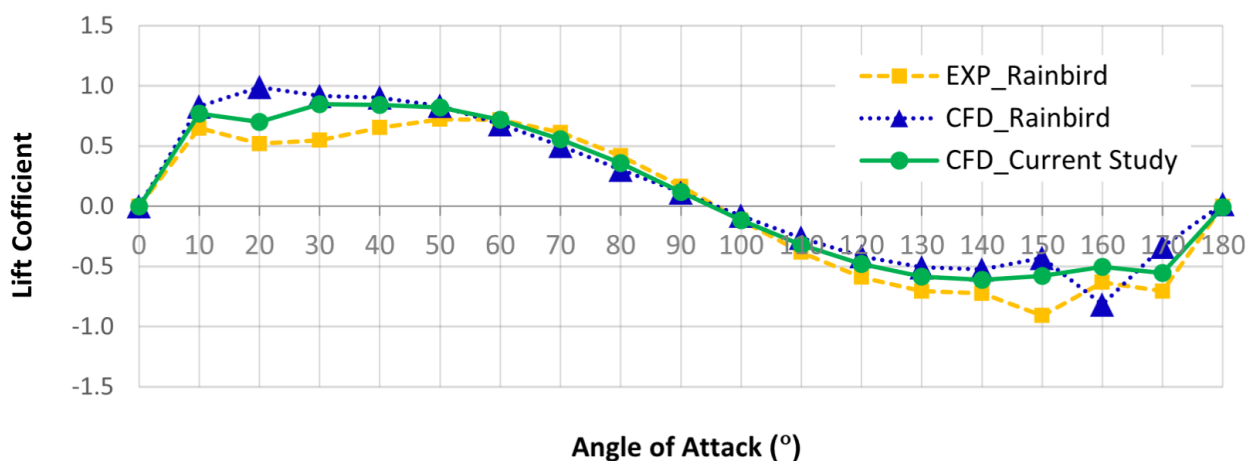
- Uobičajeno se postavljaju na višije tornjeve što omogućava pristup manje zaklonjenom i manje turbulentnom vjetru. Time iskorištavaju vjetar većeg potencijala energije, a izbjegavanjem turbulencija podložni su smanjenim dinamičkim opterećenjima [2]
- Lopatice, a posebno lopatice H-Darrieus vjetroturbina, su jednostavnije i jeftinije za proizvesti zbog poprečnog presjeka koji je isti cijelom duljinom lopatice [4]

Nedostaci nad ostalim vjetroturbinama s vertikalnom osi:

- Zamor materijala je značajan problem kojeg treba uzimati u obzir pri odabiru materijala i dizajnu lopatica. Zamor materijala se događa kao posljedica cikličkih dinamičkih naprezanja lopatica koje nastaje promjenom smjera aerodinamičkih sila ovisno o položaju lopatice prilikom njenog putovanja oko rotora [2]
- Lopatice H-Darrieus vjetroturbina su opterećene na savijanje. Zahtijevaju čvrstu i krutu konstrukciju koja izdržava to opterećenje uz prihvatljivo male elastične deformacije [2]
- Lopatice H-Darrieus vjetroturbina imaju aerodinamičke gubitke (otpor) u točkama spajanja na nosače. Također, na vrhovima lopatica se javljaju gubici zbog vrtloženja zraka iz strane lopatice s višim na stranu lopatice s nižim tlakom.  $\Phi$ -Darrieus vjetroturbine stvaraju jednaku snagu cijelom duljinom lopatice [2]

## 4. IZRADA NUMERICKE SIMULACIJE

Budući da je provođenje ispitivanja geometrije u zračnim tunelima te u stvarnim eksploatacijskim uvjetima nepraktično i financijski neodrživo sve do podmaklih stadija znanstvenih istraživanja, velika se pažnja posvećuje izradi i validaciji uvjerljivih CFD analiza. Od velikog značaja je spomenuti znanstveni rad [1] u kojem se nastoje definirati uvjeti 2D CFD simulacije H-Darrieusove vjetroturbine s 3 lopatice koje rezultiraju velikom točnošću u usporedbi s ranije provedenim eksperimentalnim ispitivanjima. Za validaciju simulacije autori su koristili eksperimentalne podatke iz prethodne literature (slika 4.1).



Slika 4.1 Statička aerodinamička karakteristika aeroprofila turbine; usporedba koeficijenata uzgona s CFD analizama i eksperimentalnim podacima [1]

Kao nastavak na njihova istraživanja, proučavat će se utjecaj izbora geometrije profila lopatice na rad H-Darrieus vjetroturbine s 3 jednako razmaknute lopatice. Stavlja se naglasak na odabir NACA 0018 profila za profil presjeka lopatice H-Darrieus vjetroturbine.

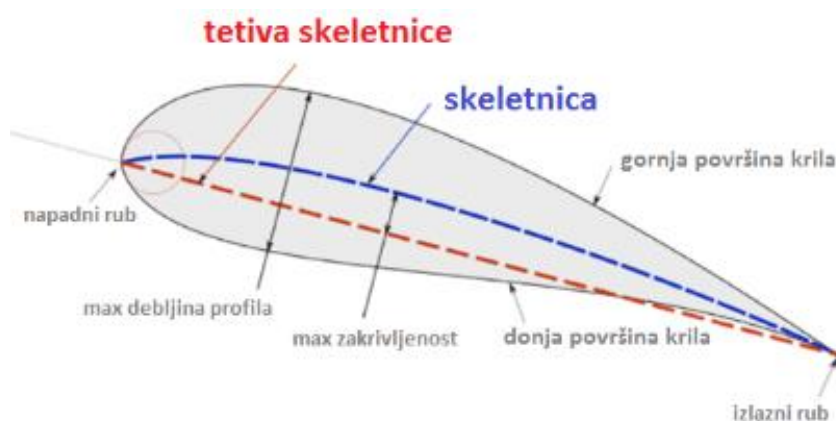
Za istraživanje se provodi 2D CFD simulacija. Iako 3D simulacija može dati točnije rezultate budući da uzima u obzir sponne između rotora i lopatica te aerodinamičke pojave na krajevima lopatica, 2D simulacija je značajno praktičnija te daje dovoljno točne rezultate uz korištenje tek djelića računalnih resursa potrebnih za jednako detaljnu 3D simulaciju.

Istraživanje će se provesti tranzijentnom 2D CFD (eng Computational Fluid Dynamics) simulacijom u programskom okruženju Ansys 2023 R2 uz upotrebu rješavača Fluent. Tijek postavljanja simulacije je sljedeći:

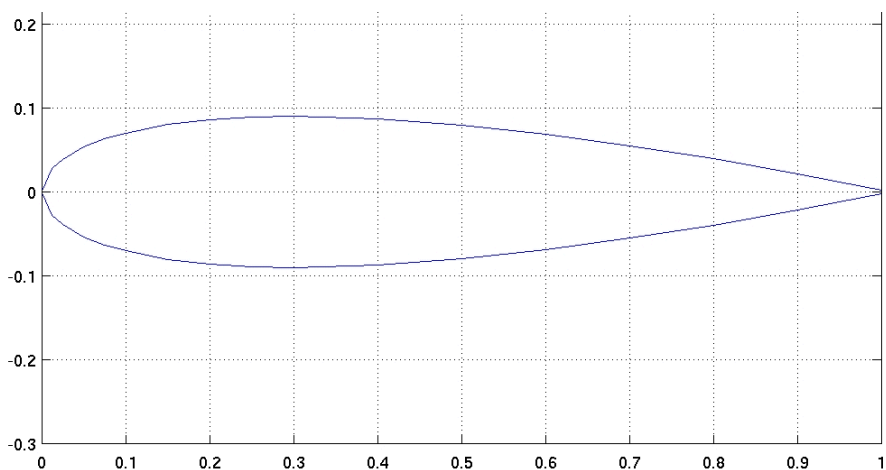
1. Definiranje profila lopatice u Ansys programskom paketu
2. Definiranje domene simulacije u Ansys programskom paketu
3. Umrežavanje domene
4. Definiranje ostalih parametara simulacije

#### 4.1 Priprema simulacije

NACA 0018 profil, izabran za ovu simulaciju, je simetrični aeroprofil. Njegova tetiva, linija koja spaja napadnu ivicu s izlaznom ivicom, dijeli ga na dvije simetrične polovice. Simetričnost je vidljiva na slici 4.3 i još jasnije u tablici koordinata točaka koje definiraju ovaj profil (tablica 4.1). NACA 0018 profil karakterizira maksimalna debljina od 18% duljine tetive na 30% duljine tetive. [12] Izrazi korišteni za definiranje dijelova geometrije aeroprofila su prikazani na slici 4.2.



Slika 4.2 Nazivi dijelova lopatice [5]



Slika 4.3 *NACA 0018 profil* [13]

Tablica 4.1 *Koordinate točaka koje definiraju NACA 0018 profil*

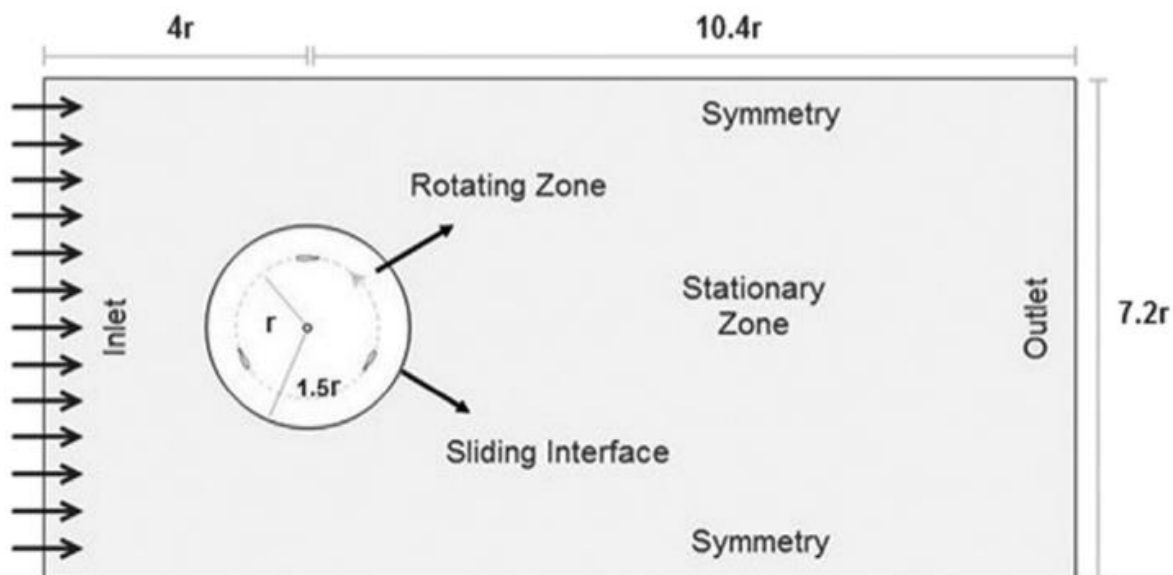
X KOORDINATA	Y KOORDINATA GORNJE POVRŠINE	Y KOORDINATA DONJE POVRŠINE
1,000000	0,001890	-0,001890
0,950000	0,012100	-0,012100
0,900000	0,021720	-0,021720
0,800000	0,039350	-0,039350
0,700000	0,054960	-0,054960
0,600000	0,068450	-0,068450
0,500000	0,079410	-0,079410
0,400000	0,087050	-0,087050
0,300000	0,090030	-0,090030
0,250000	0,089120	-0,089120
0,200000	0,086060	-0,086060
0,150000	0,080180	-0,080180
0,100000	0,070240	-0,070240
0,075000	0,063000	-0,063000

0,050000	0,053320	-0,053320
0,025000	0,039220	-0,039220
0,012500	0,028410	-0,028410
0,000000	0,000000	0,000000

NACA profil je definiran točkama u tablici 4.1. Interpolacijom tih točaka se dobije krivulja koja opisuje profil. Profil je definiran na jediničnoj dužini po x koordinati, od početka u 0, do maksimalne duljine od 1. Duljina profila se lako skalira na potrebnu koristeći Microsoft Excel te se kao .txt tekstualna datoteka poziva u Ansys Design Modeler. Uz skaliranje, profil je moguće i translirati. Obje operacije su iskorištene u ovom radu za definiranje veličine i pozicije jedne lopatice u rotoru. Vratilo rotora je postavljeno u ishodište koordinatnog sustava, a prva lopatica je sredinom svoje tetive postavljena vertikalno ( $x = 0$ ) iznad ishodišta. Tetiva lopatice je postavljena horizontalno (paralelno s osi apscise), tj. tangentno na kružnicu po kojoj se giba lopatica. Ostale dvije lopatice nastaju naredbom Revolve oko ishodišta (u 3D okruženju je to zadano kao rotacije oko Z-osi, pravac  $Z = 1$ ) za  $120^\circ$  te potom za  $240^\circ$  uz zadržavanje početne i novonastale forme.

Domena simulacije je definirana kao u prethodnim radovima. Sastoji se od stacionarne i rotacijske zone. Od rotacijske zone domene su oduzete površine rotora vjetroturbine s 3 NACA 0018 profila i vratilo oko kojeg rotira rotor. Spone koje povezuju vratilo i lopatice nisu uključene u simulaciju budući da je za svrhu ove 2D simulacije odabran presjek vjetroturbine koji ih ne sadržava. Izgled i dimenzije domene su definirane po uzoru na prethodne radove koristeći vrijednosti kako je objašnjeno slikom 4.4 i tablicom 4.2.





Slika 4.4 Domena 2D simulacije H-Darrieusove vjetroturbine s 3 lopatice ovisna o polumjeru rotora [1]

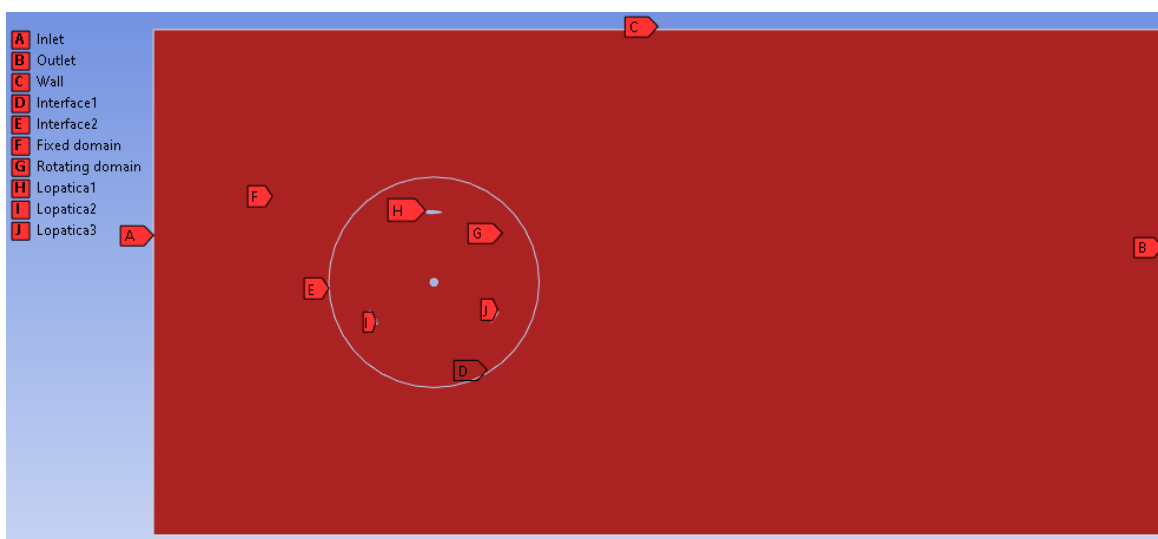
Tablica 4.2 Dimenzije domene simulacije

Profil lopatice	NACA 0018
Broj lopatica	3
Kut između lopatica	120°
Duljina tetive lopatica	83 mm
Duljina lopatice	1000 mm
Radijus rotora	375 mm
Promjer osovine rotora	40 mm
Promjer rotirajuće zone	1125 mm
Duljina ulaznog i izlaznog ruba	2700 mm
Ukupna duljina stacionarne zone	5400 mm
Udaljenost centra rotacijske zone od ulaznog ruba	1500 mm
Udaljenost centra rotacijske zone od izlaznog ruba	3900 mm

Geometrija domene je definirana u Ansys Design Modeleru. Definirana su dva plošna tijela (eng. Surface body): jedno koje predstavlja stacionarni dio domene i drugo za rotacijski dio domene od kojeg su Boolean operacijom oduzete geometrije vratila i lopatica rotora.

## 4.2 Numerička mreža

Definirana geometrija je uvezena u Meshing komponentu Ansys Workbencha. Tamo su joj definirani nazivi rubova (eng. named selection) za potrebe definiranja rubnih uvjeta u Fluentu. Dijelovi su imenovani nazivima na slici 4.5. Koristimo standardne izraze: Inlet, Outlet, Interface, Domain koje će u sljedećem koraku rješavač Fluent sam prepoznati kao osnovu za automatsko definiranje svojstava rubnih uvjeta. Svi drugi neprepoznati nazivi će biti prvotno definirani kao zidovi (Wall) sa svojstvom „no slip“.



Slika 4.5 Imenovanje dijelova domene

U modulu za umrežavanje je potom generirana numerička mreža s postavkama prikazanim na slici 4.6. Odabrana je veličina elemenata mreže od 0,02 m i minimalom veličinom zaobljenja od 0,05 m. Ovom naredbom se dobiva gruba mreža od tridesetak tisuća konačnih elemenata. S tako grubom mrežom bi loše opisali pojave u graničnom sloju uz stijenke lopatica. Kako bi poboljšali rezultate, potrebno je koristiti finiju mrežu, no to bi rezultiralo mrežom s mnogostruko većim brojem konačnih elemenata što bi značajno povisilo hardverske zahtjeve i odužilo vrijeme simulacije. Umjesto globalne mreže velike gustoće konačnih elemenata, moguće je lokalno ugustiti mrežu, na mjestima od posebnog interesa. Definirani su manji elementi uz rubove lopatica naredbom Edge Sizing (slika 4.7). Naredbom Inflation zahtijevamo kreiranje 20 slojeva elemenata uz rub stijenke. Parametri ove naredbe su prikazani na slici 4.8.

Details of "Mesh" <span style="float: right;">▼ 🔍 □ ×</span>	
+ <b>Display</b>	
- <b>Defaults</b>	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	Fluent
Element Order	Linear
<input type="checkbox"/> Element Size	2,e-002 m
Export Format	Standard
Export Preview Surface Mesh	No
- <b>Sizing</b>	
Use Adaptive Sizing	No
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1,2)
Mesh Defeaturing	No
Capture Curvature	Yes
<input type="checkbox"/> Curvature Min Size	1,e-005 m
<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	Default (18,°)
Capture Proximity	No
Bounding Box Diagonal	6,0374 m
Average Surface Area	7,2882 m <sup>2</sup>
Minimum Edge Length	3,1374e-004 m
- <b>Quality</b>	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
<input type="checkbox"/> Target Skewness	Default (0,9)
Smoothing	Medium
Mesh Metric	None
+ <b>Inflation</b>	
+ <b>Batch Connections</b>	
+ <b>Advanced</b>	
- <b>Statistics</b>	
<input type="checkbox"/> Nodes	201814
<input type="checkbox"/> Elements	198508
Show Detailed Statistics	No

Slika 4.6 Globalne postavke mreže

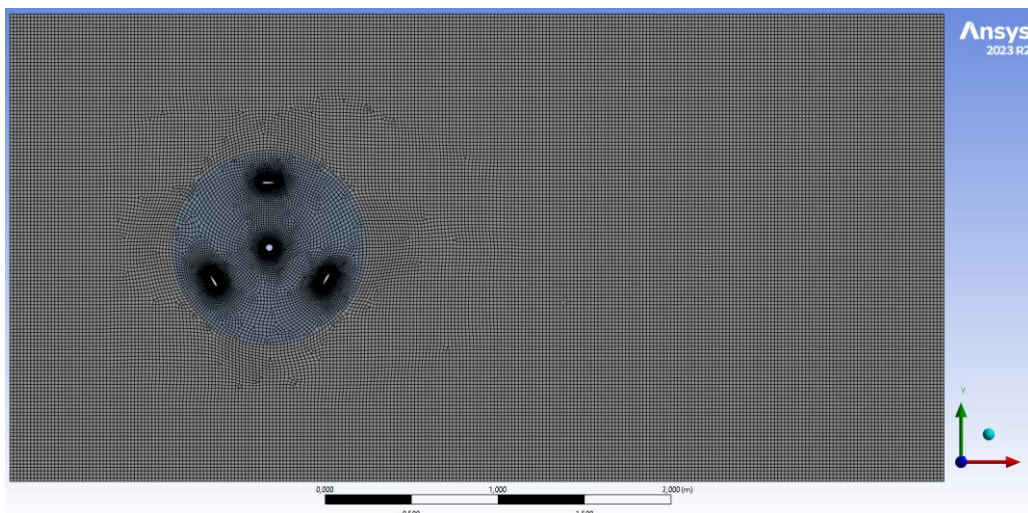
Details of "Edge Sizing" - Sizing	
<b>Scope</b>	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	7 Edges
<b>Definition</b>	
Suppressed	No
Type	Element Size
<input type="checkbox"/> Element Size	1,e-004 m
<b>Advanced</b>	
<input type="checkbox"/> Growth Rate	1,1
Capture Curvature	Yes
<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	Default (18,°)
<input type="checkbox"/> Local Min Size	Default (1,e-005 m)
Capture Proximity	No
Bias Type	No Bias

Slika 4.7 Parametri lokalnog ugušćenja mreže uz rubove

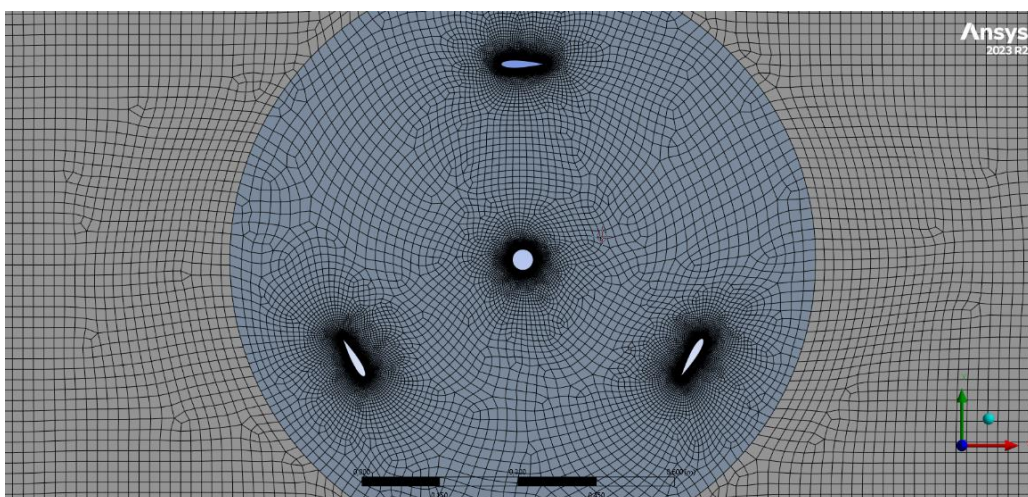
Details of "Inflation" - Inflation	
<b>Scope</b>	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Face
<b>Definition</b>	
Suppressed	No
Boundary Scoping Method	Geometry Selection
Boundary	7 Edges
Inflation Option	First Layer Thickness
<input type="checkbox"/> First Layer Height	2,8e-005 m
<input type="checkbox"/> Maximum Layers	20
<input type="checkbox"/> Growth Rate	1,2
Inflation Algorithm	Pre

Slika 4.8 Parametri slojeva inflacije

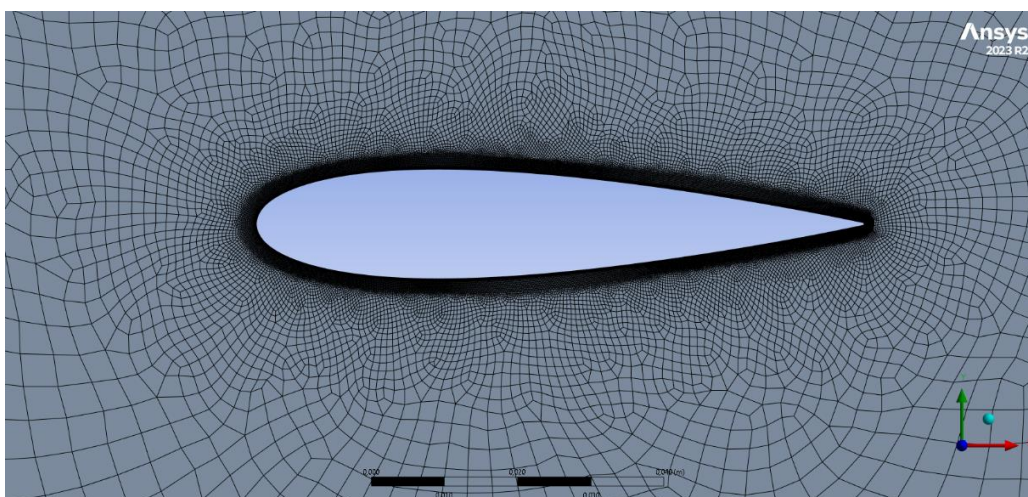
Mreža generirana ovim uvjetima ima 198508 elemenata sa 201814 čvorova i prikazana je na slici 4.9. Na slici 4.10 je prikazana mreža rotacijske domene. Ugušćena mreža oko lopatice sa 20 inflacijskih slojeva je prikazana na slici 4.11. Na slikama 4.12 i 4.13 su uvećani detalji ulazne i izlazne ivice. Na ulaznoj ivici je moguće zamijetiti dobru rezoluciju kojom elementi definiraju zakrivljenost. Na izlaznoj ivici je lako primijetiti dobro definiranih 20 inflacijskih slojeva koji obavijaju cijelu lopaticu.



Slika 4.9 Mreža konačnih elemenata cijele domene

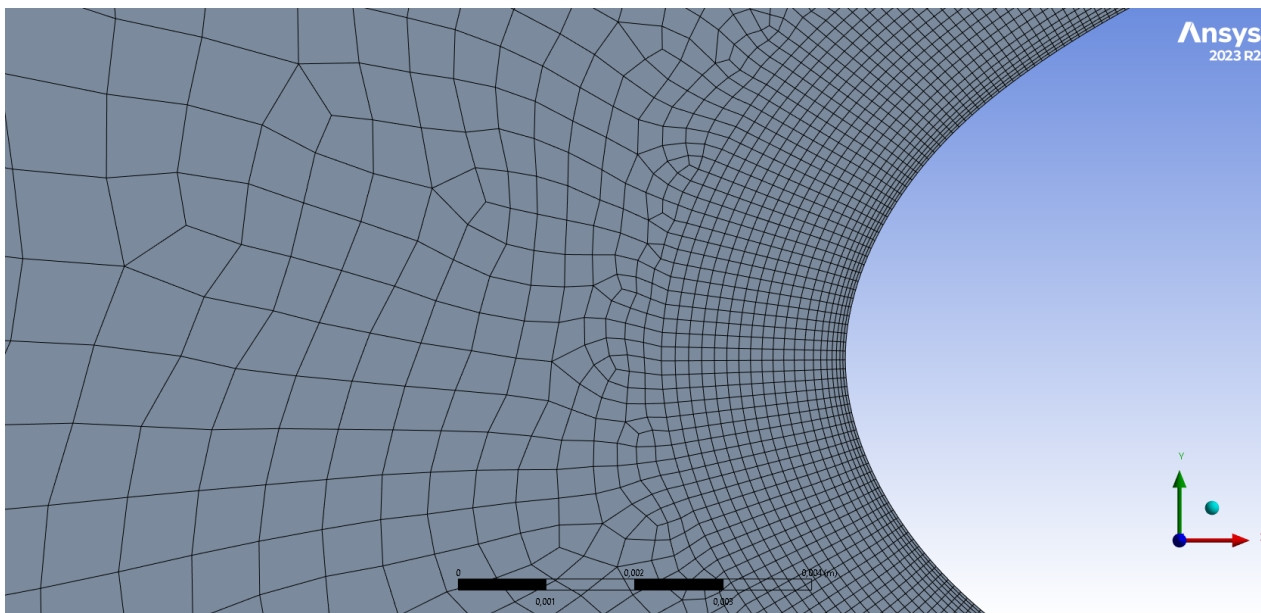


Slika 4.10 Ugušćena mreža konačnih elemenata oko rotora

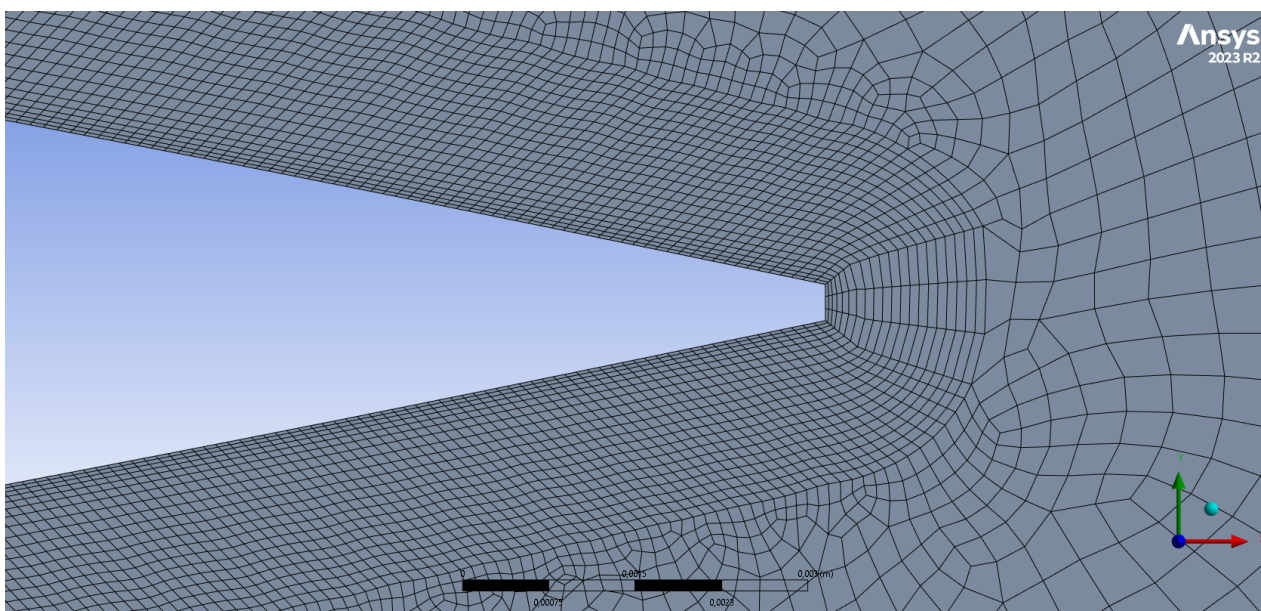


Slika 4.11 Lokalna ugušćena mreža konačnih elemenata oko lopatice





Slika 4.12 Lokalna ugušćena mreža konačnih elemenata oko napadnog ruba lopatice



Slika 4.13 Lokalna ugušćena mreža konačnih elemenata oko izlaznog ruba lopatice

Na slikama 4.14-4.18 u nastavku su pokazatelji kvalitete mreže prizvani naredbom „Mesh Metric“ unutar Ansys Meshing sučelja. Mreža je, sudeći po njima, prihvatljiva za nastavak postupka.

Mesh Metric	Aspect Ratio
<input type="checkbox"/> Min	1,
<input type="checkbox"/> Max	5,5298
<input type="checkbox"/> Average	1,3936
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0,71386

Slika 4.14 Pokazatelj kvalitete mreže „Aspect Ratio“

Mesh Metric	Skewness
<input type="checkbox"/> Min	1,3057e-010
<input type="checkbox"/> Max	0,87511
<input type="checkbox"/> Average	0,1467
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0,13823

Slika 4.15 Pokazatelj kvalitete mreže „Skewness“

Mesh Metric	Orthogonal Quality
<input type="checkbox"/> Min	0,36795
<input type="checkbox"/> Max	1,
<input type="checkbox"/> Average	0,95886
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	5,6724e-002

Slika 4.16 Pokazatelj kvalitete mreže „Orthogonal Quality“

Mesh Metric	Element Quality
<input type="checkbox"/> Min	0,20257
<input type="checkbox"/> Max	0,99953
<input type="checkbox"/> Average	0,82353
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0,16187

Slika 4.17 Pokazatelj kvalitete mreže „Element Quality“

Mesh Metric	Maximum Element Edge Length
<input type="checkbox"/> Min	8,4634e-005 m
<input type="checkbox"/> Max	3,7165e-002 m
<input type="checkbox"/> Average	4,1165e-003 m
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	7,7072e-003 m

Slika 4.18 Pokazatelj kvalitete mreže „Maximum Element Edge Length“

### 4.3 Ostali parametri simulacije

Nakon uspješnog definiranja geometrije i mreže, sljedeći korak je definirati ostale uvjete simulacije u programskom okruženju Ansys Fluent. Pri pokretanju je odabrana opcija duple preciznosti (eng. double precision) te korištenje više jezgri procesora pri kalkulacijama.

Pri postavljanju generalnih postavki odabran je rješavač temeljen na tlaku (eng. pressure-based solver). Na ovom ekranu je moguće odabrati opciju stacionarnog (eng. steady) ili nestacionarnog (eng. transient) vremena, ovisno o tome koju vrstu simulacije želimo.

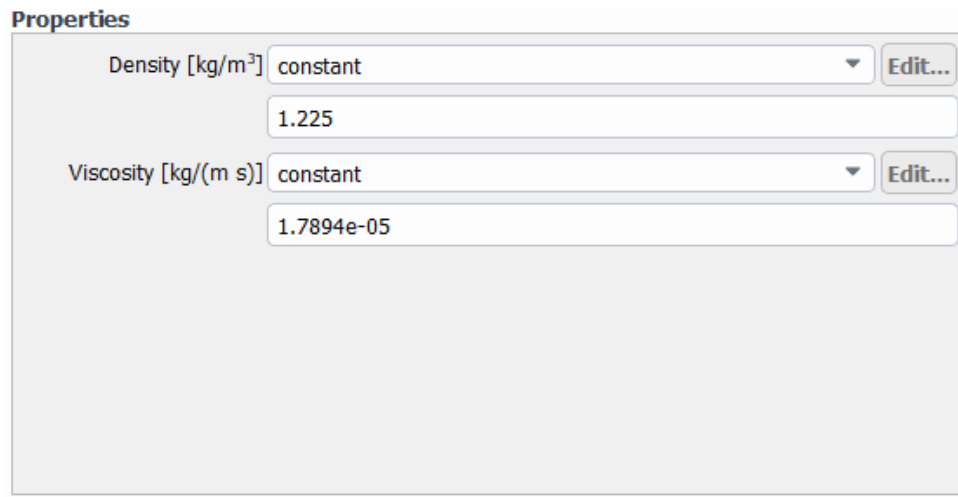
U sučelju na slici 4.19 odabran je k- $\omega$  SST turbulentni model CFD simulacije s dvije dodatne jednadžbe često korišten za simulacije nalik ovoj zbog dobre točnosti i uspješnog opisivanja pojava pri pokretanju H-Darrieus vjetroturbina s vertikalnom osi te dobre usporedivosti s eksperimentalnim istraživanjima.

The image shows the 'Viscous Model' dialog box in Ansys Fluent. The 'Model' section has 'k-omega (2 eqn)' selected. Under 'k-omega Model', 'SST' is chosen. 'k-omega Options' has 'Low-Re Corrections' unchecked. 'Near-Wall Treatment' is set to 'correlation'. 'Options' has 'Curvature Correction' and 'Production Limiter' checked. 'Transition Options' has 'Transition Model' set to 'none'. 'Curvature Correction Options' has 'CCURV' set to 'constant' with a value of 1. The 'Model Constants' section has the following values: Alpha\*\_inf = 1, Alpha\_inf = 0.52, Beta\*\_inf = 0.09, a1 = 0.31, Beta\_i (Inner) = 0.075, Beta\_i (Outer) = 0.0828, TKE (Inner) Prandtl # = 1.176, TKE (Outer) Prandtl # = 1, SDR (Inner) Prandtl # = 2, SDR (Outer) Prandtl # = 1.168, and Production Limiter Clip Factor = 10. Buttons for 'OK', 'Cancel', and 'Help' are at the bottom.

Slika 4.19 Parametri modela simulacije

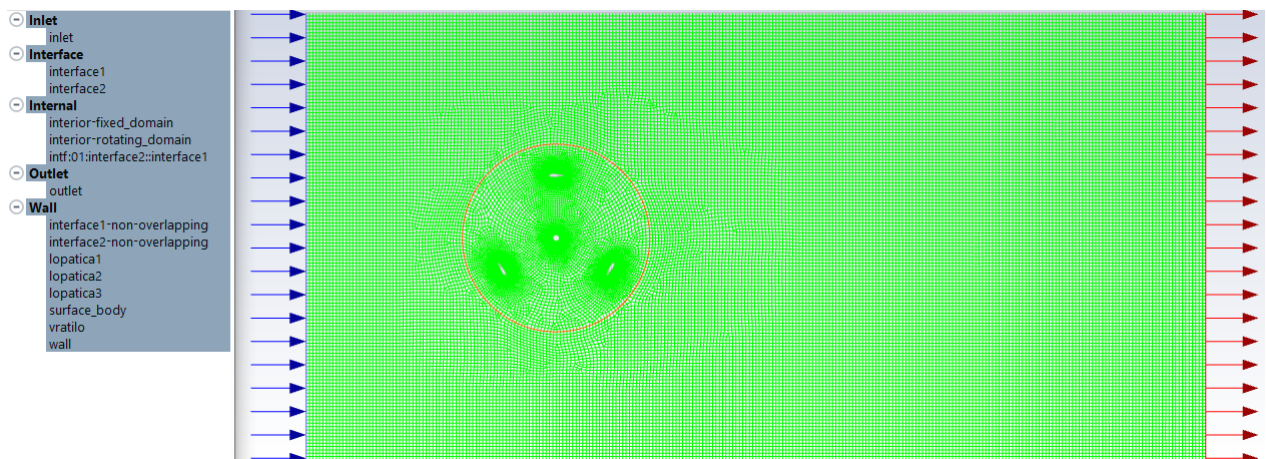
Kao fluid je definiran zrak gustoće  $1,225 \text{ kg/m}^3$  i zadane viskoznosti  $1,7894 \cdot 10^{-5} \text{ kg/(ms)}$  (slika 4.20).





Slika 4.20 Svojstva fluida

Domenu je u rubrici „Cell Zone Conditions“ rješavač Fluent podijelio na dva dijela prepoznavši ranije definiranu podjelu imenovanjem dijelova domene u programskom okruženju „Ansys Meshing“. Zadržani su parametri fiksne domene, a rotirajućoj domeni pri analizi u tranzijentnom vremenu dodjeljujemo svojstvo gibanja mreže (eng. mesh motion) uz zadanu brzinu rotacije od 68 rad/s, kako je korišteno u simulacijama prethodnih autora.



Slika 4.21 Omrežena domena s imenovanim rubnim uvjetima u rješavaču Fluent

Zadaju se sljedeći rubni uvjeti, od kojih je neke Fluent ponovo sam prepoznao po ranije dodijeljenim nazivima (slika 4.21 ):

- Lijevi rub domene je definiran kao velocity-inlet (brzina na ulazu) s vektorom brzine iznosa 6 m/s u smjeru osi x (slika 4.22)
- Desni rub domene je definiran kao „pressure-outlet“ (tlak na izlazu) s iznosom „Gauge-Pressure“ 0 Pa

- Lopatice i vratilo rotora su definirane kao „no slip wall“ čime smo im pridružili relativnu brzinu gibanja fluida na njihovoj granici u iznosu 0 m/s, tj. zajedničko gibanje lopatice i fluida na njihovoj granici
- Gornji i donji rub domene su definirani kao „wall“ s posmičnim naprezanjem fluida (eng. Shear Stress) iznosa 0 Pa. Utjecaji tih rubova na ostatak domene se time zanemaruju
- Unutarnji rub stacionarne domene i vanjski rub rotirajuće upareni su u granično sučelje mreže (eng. Mesh interface)

**Velocity Inlet** ✕

Zone Name  
inlet

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase Potential Structure UDS

Velocity Specification Method **Magnitude, Normal to Boundary**

Reference Frame **Absolute**

Velocity Magnitude [m/s] **6**

Supersonic/Initial Gauge Pressure [Pa] **0**

**Turbulence**

Specification Method **Intensity and Viscosity Ratio**

Turbulent Intensity [%] **5**

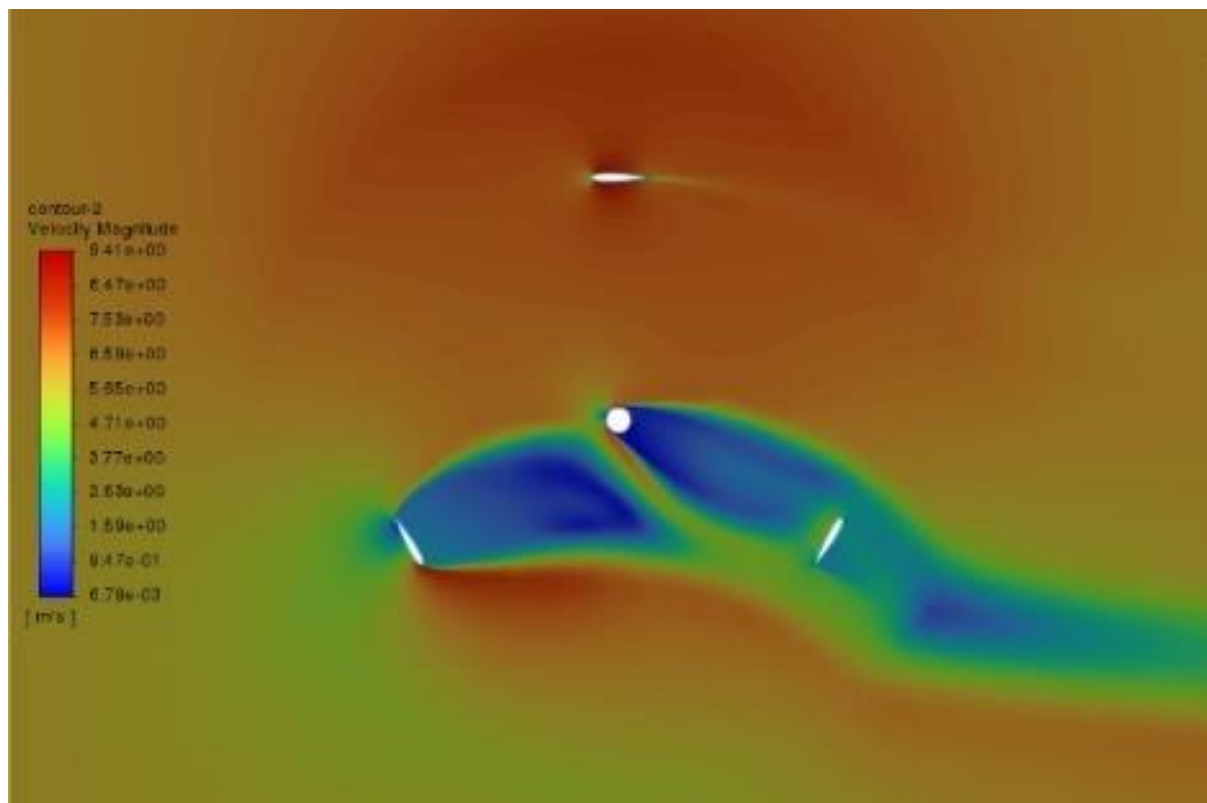
Turbulent Viscosity Ratio **10**

**Apply** **Close** **Help**

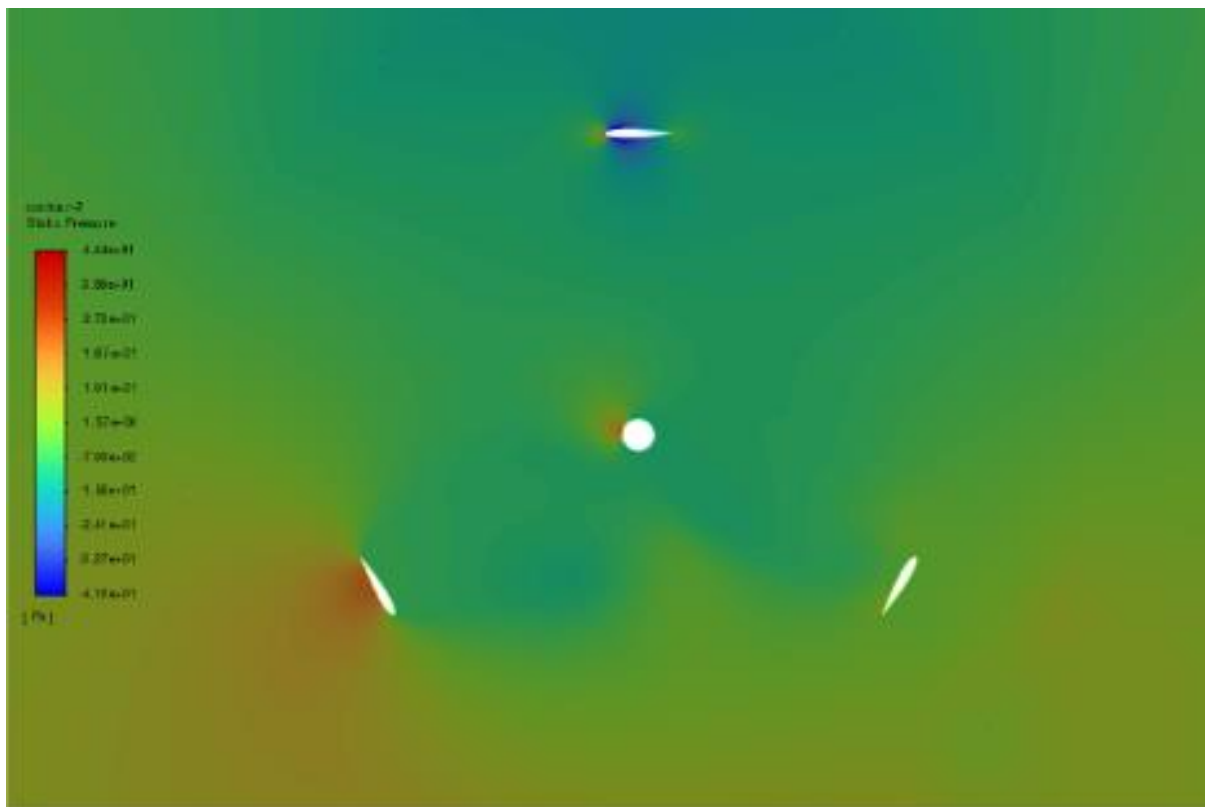
Slika 4.22 Rubni uvjet na ulazu domene

## 5. REZULTATI

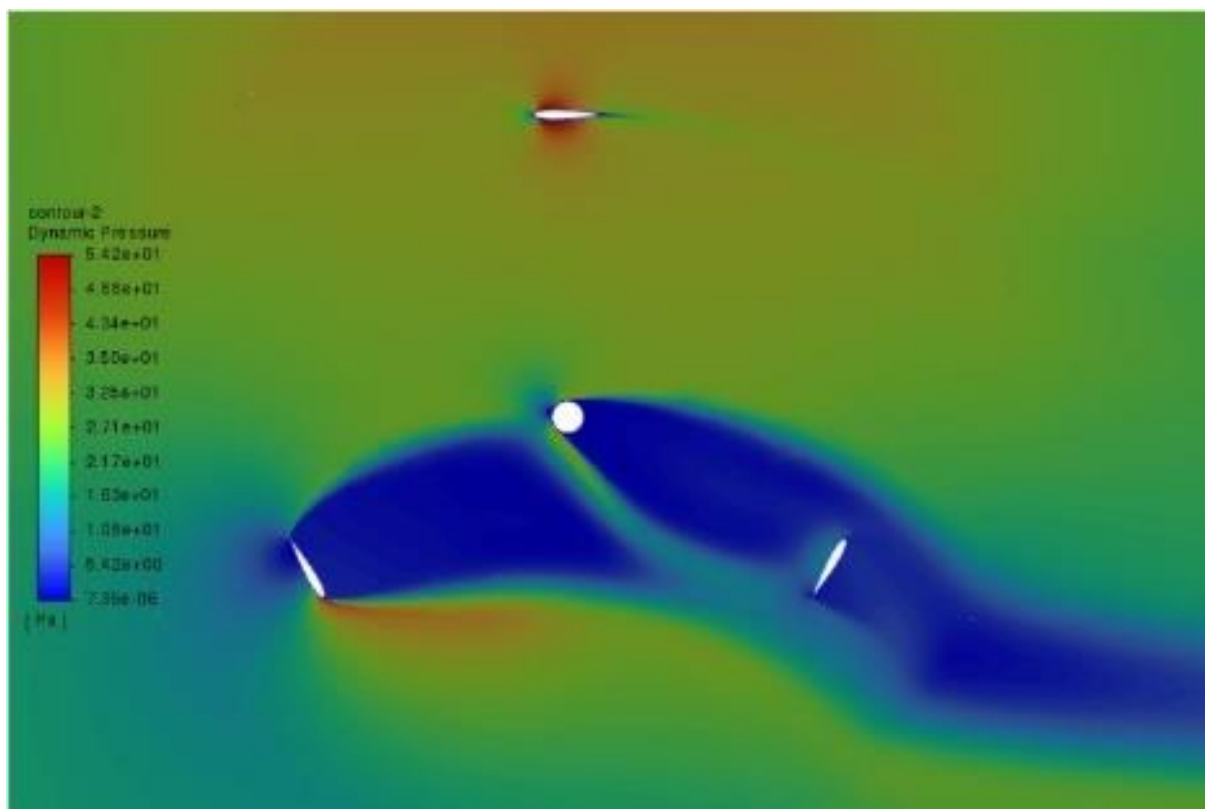
Na slikama 5.1 – 5.12 prikazane su konture brzina, statičkog i dinamičkog tlak za položaje rotora od  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  i  $90^\circ$  u odnosu na početni položaj. Položaj od  $120^\circ$  postavlja drugu lopaticu na mjesto prve te bi konture izgledale isto kao za položaj od  $0^\circ$ . Moguće je primijetiti pojavu recirkulacijskih zona na donje dvije lopatice pri zakretu rotora u iznosu od  $0^\circ$ , na gornje dvije lopatice pri zakretu od  $60^\circ$  te na sve 3 lopatice pri zakretu od  $30^\circ$  i  $90^\circ$ .



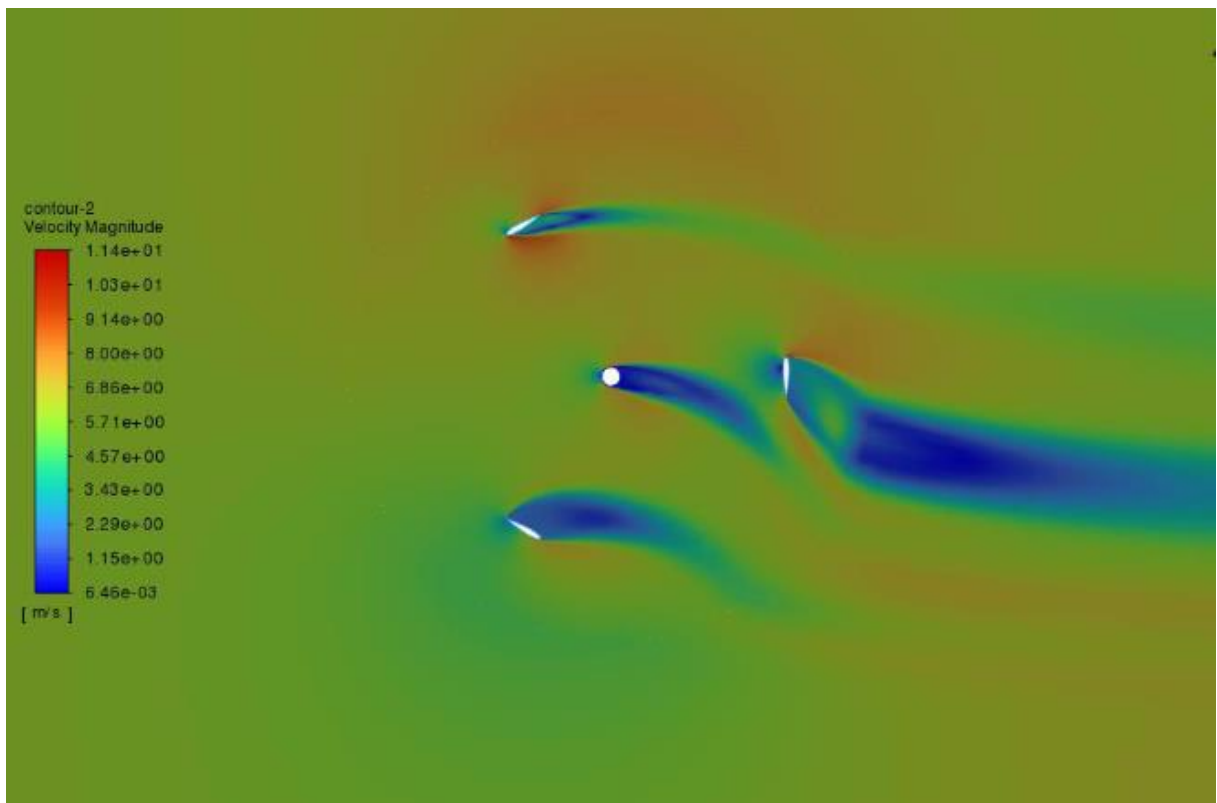
Slika 5.1 Konture magnitude brzine  $0^\circ$  zakreta rotora



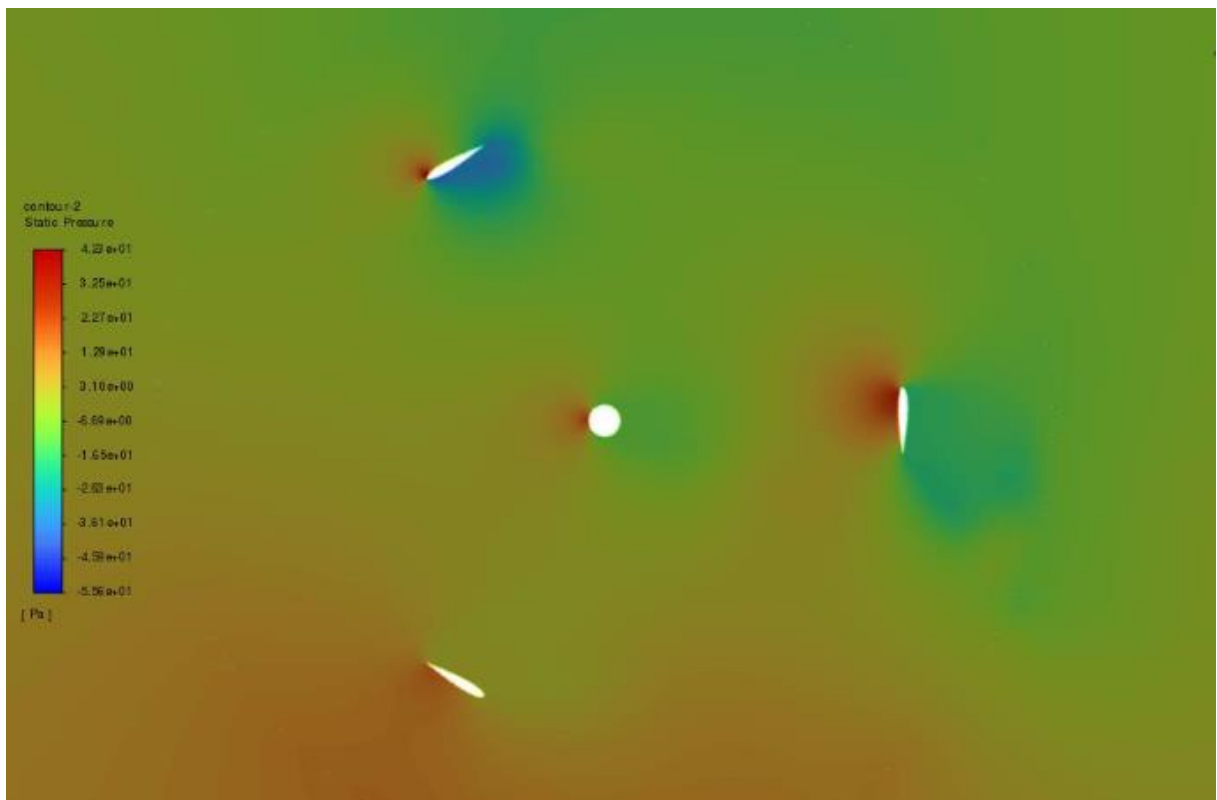
Slika 5.2 Konture statičkog tlaka za  $0^\circ$  zakreta rotora



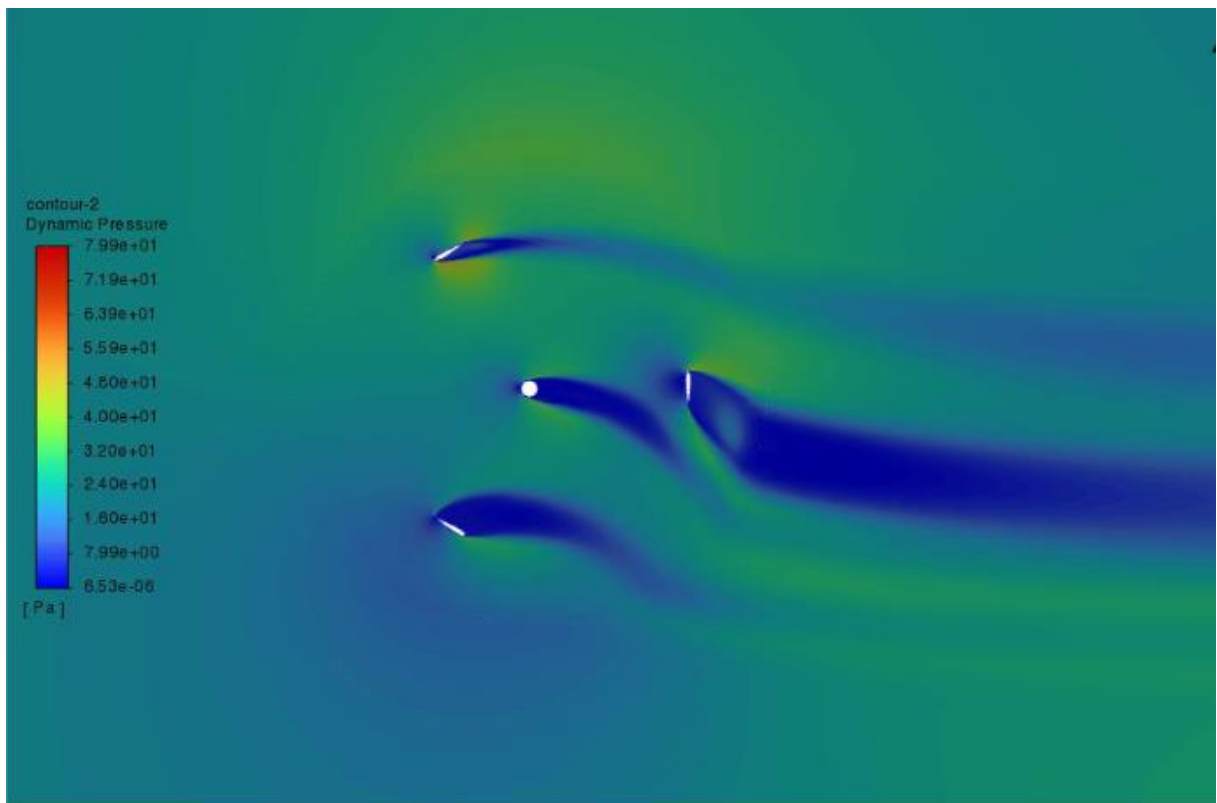
Slika 5.3 Konture dinamičkog tlaka za  $0^\circ$  zakreta rotora



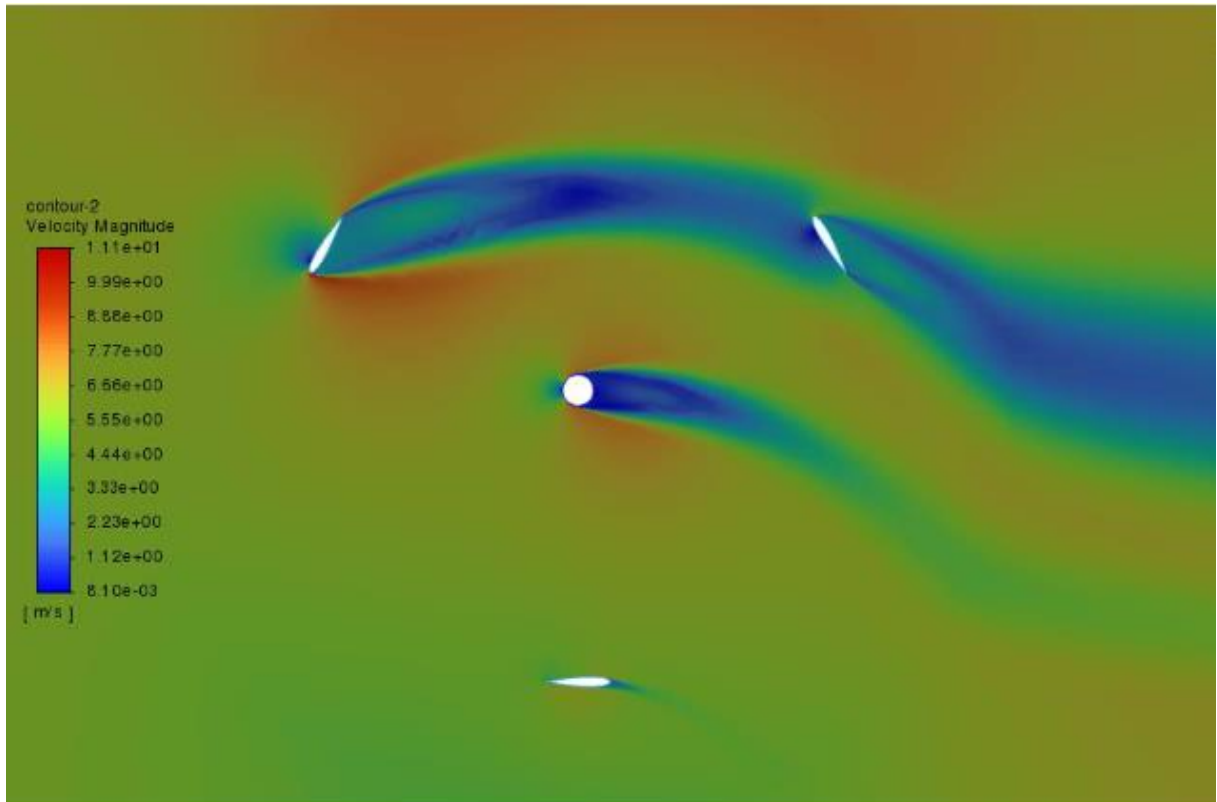
Slika 5.4 Konture magnitude brzine za 30° zakreta rotora



Slika 5.5 Konture statičkog tlaka za 30° zakreta rotora

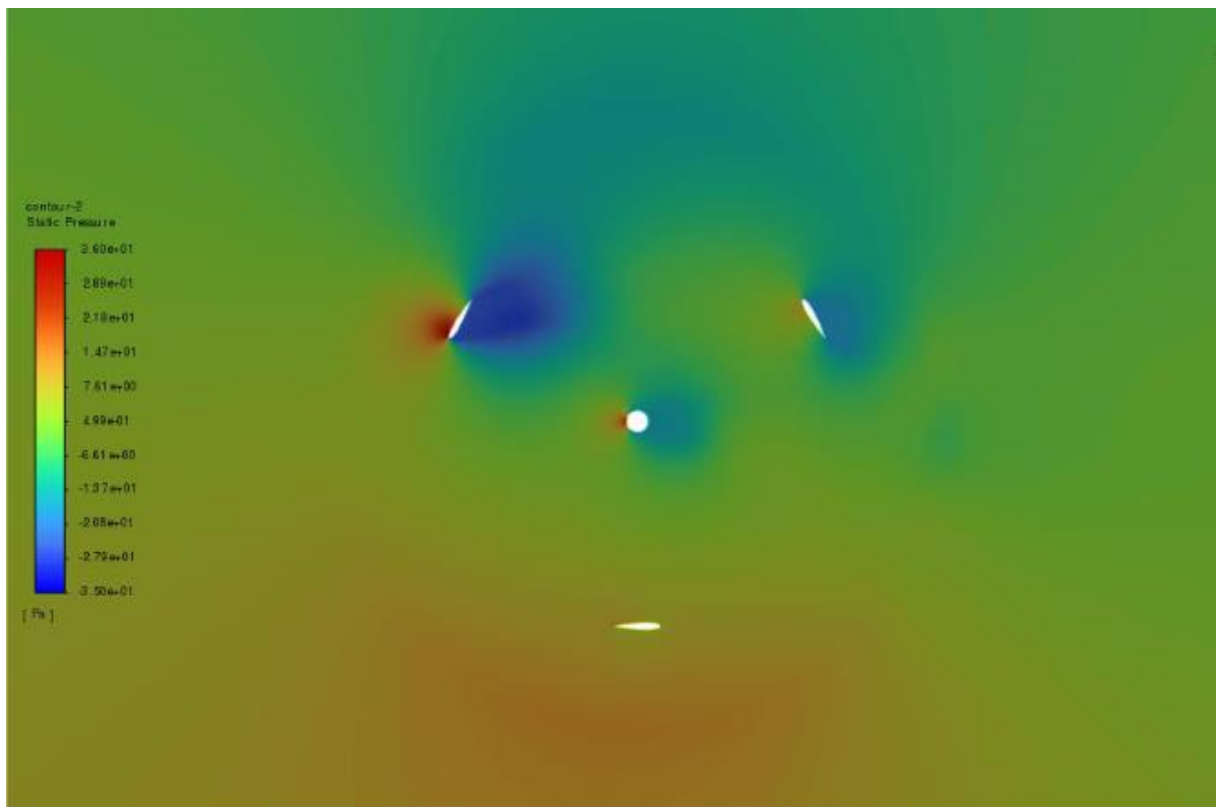


Slika 5.6 Konture dinamičkog tlaka za 30° zakreta rotora

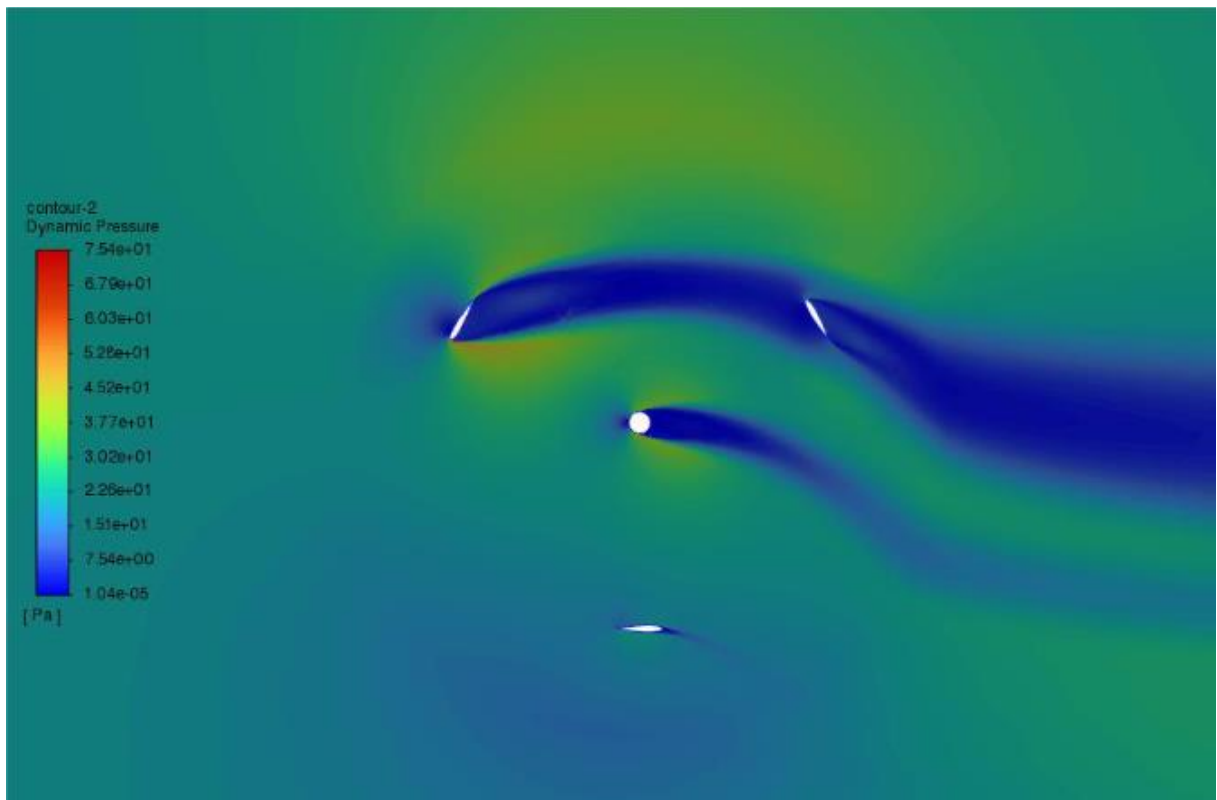


Slika 5.7 Konture magnitude brzine za 60° zakreta rotora

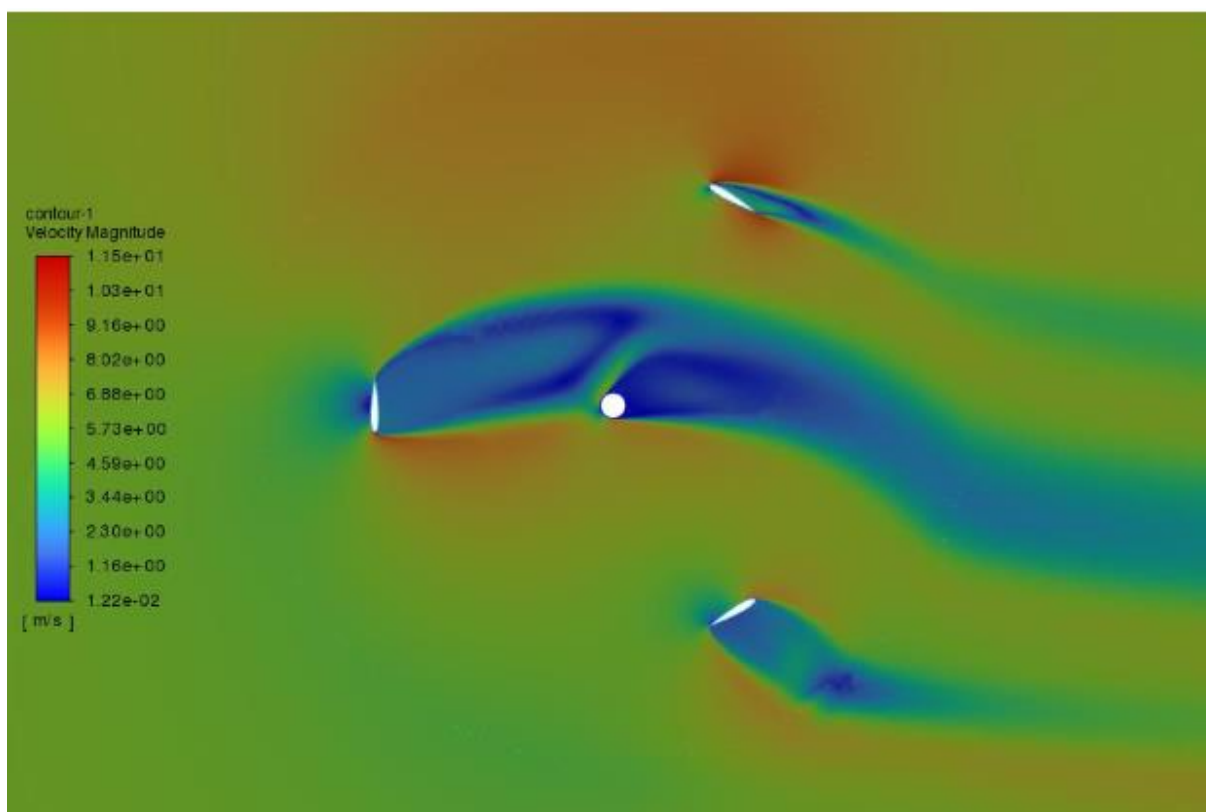




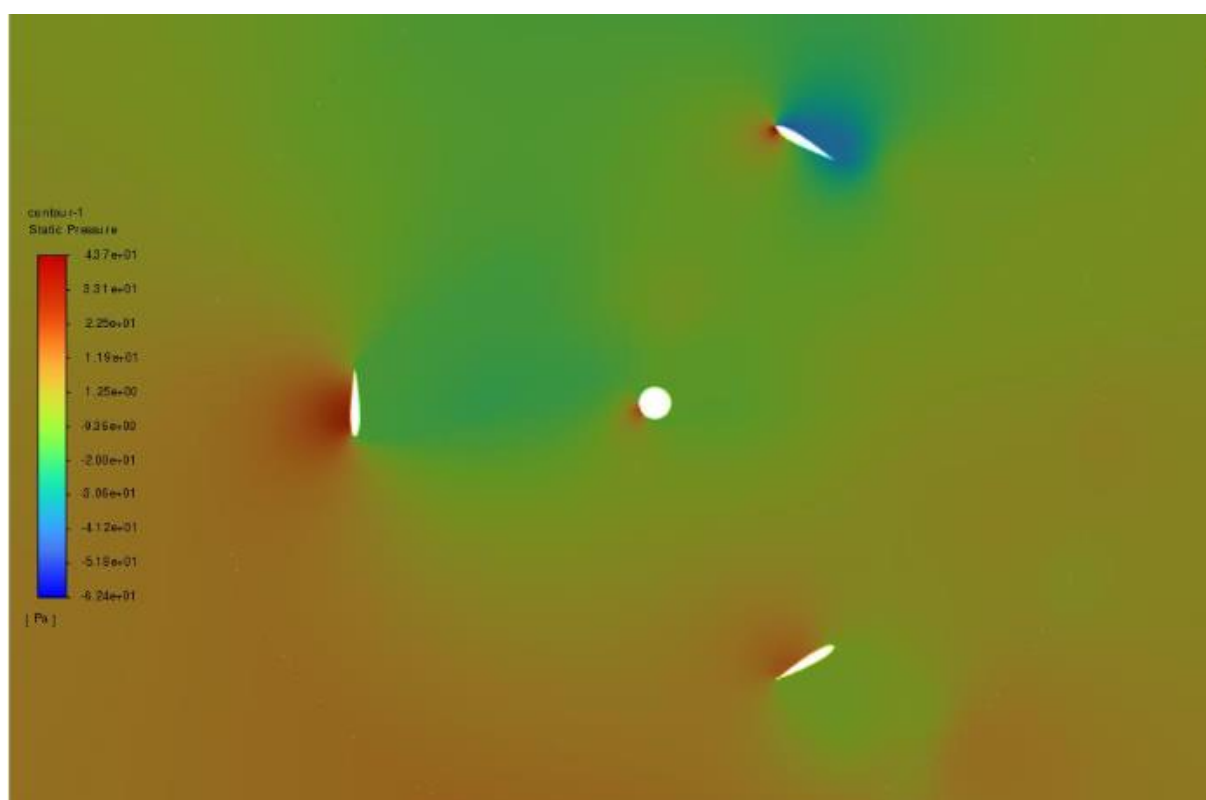
Slika 5.8 Konture statičkog tlaka za 60° zakreta rotora



Slika 5.9 Konture dinamičkog tlaka za 60° zakreta rotora

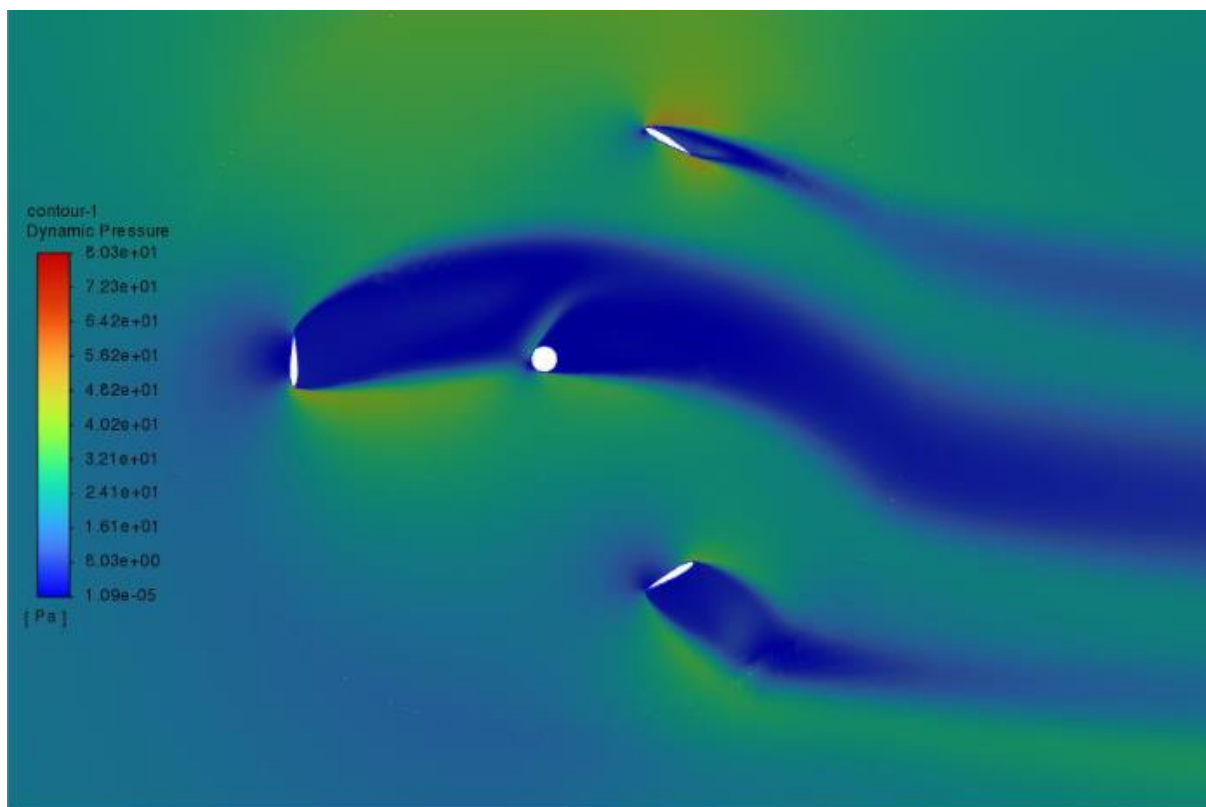


Slika 5.10 Konture magnitude brzine za 90° zakreta rotora



Slika 5.11 Konture statičkog tlaka za 90° zakreta rotora





Slika 5.12 Konture dinamičkog tlaka za 90° zakreta rotora

Za potrebe validacije simulacije odabire se usporedba koeficijenta uzgona s vrijednostima CFD simulacije iz prethodnog rada. Definira se izvješće koje prati iznose koeficijenta uzgona na sve tri lopatice (slika 5.14). Rezultati se bilježe za pomak lopatice od 10°, tj. u vremenu od 0,002567 sekundi koliko je potrebno da rotor napravi zakret od 10° pri brzini rotacije od 68 rad/s.

**Reference Values** (?)

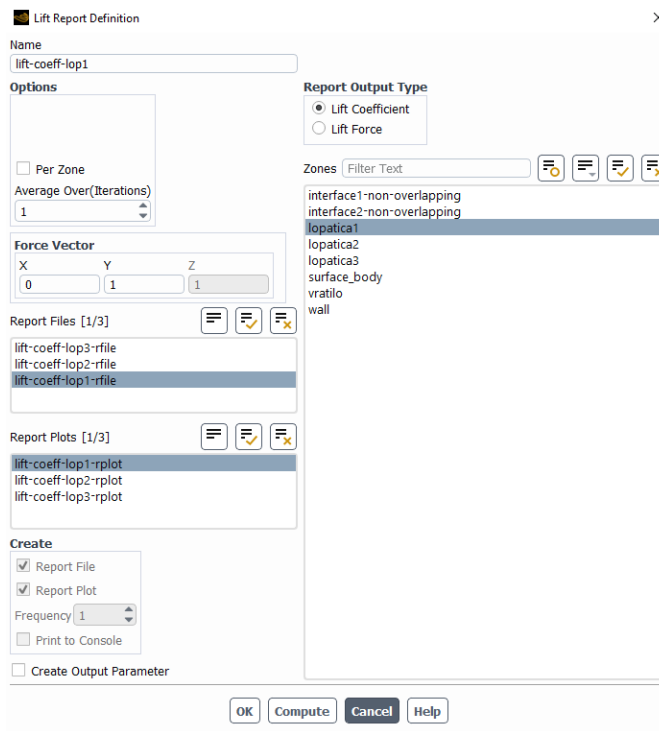
Compute from  
inlet

**Reference Values**

Area [m <sup>2</sup> ]	0.083
Density [kg/m <sup>3</sup> ]	1.225
Depth [m]	1
Enthalpy [J/kg]	0
Length [m]	0.083
Pressure [Pa]	0
Temperature [K]	288.16
Velocity [m/s]	6
Viscosity [kg/(m s)]	1.7894e-05
Ratio of Specific Heats	1.4
Yplus for Heat Tran. Coef.	300

Reference Zone  
rotating\_domain

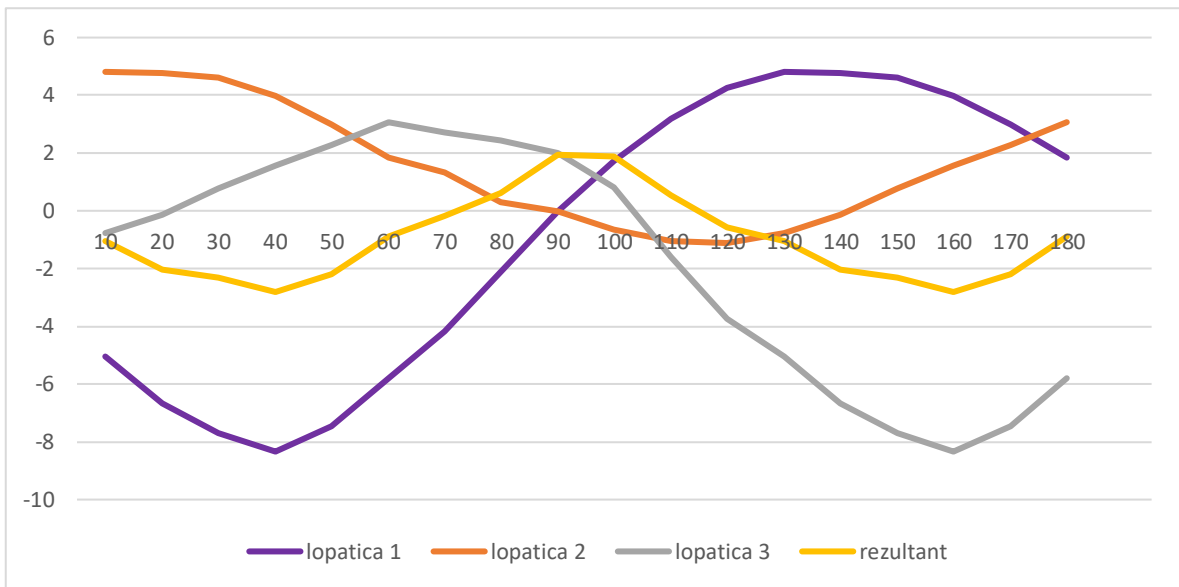
Slika 5.13 Referentne vrijednosti



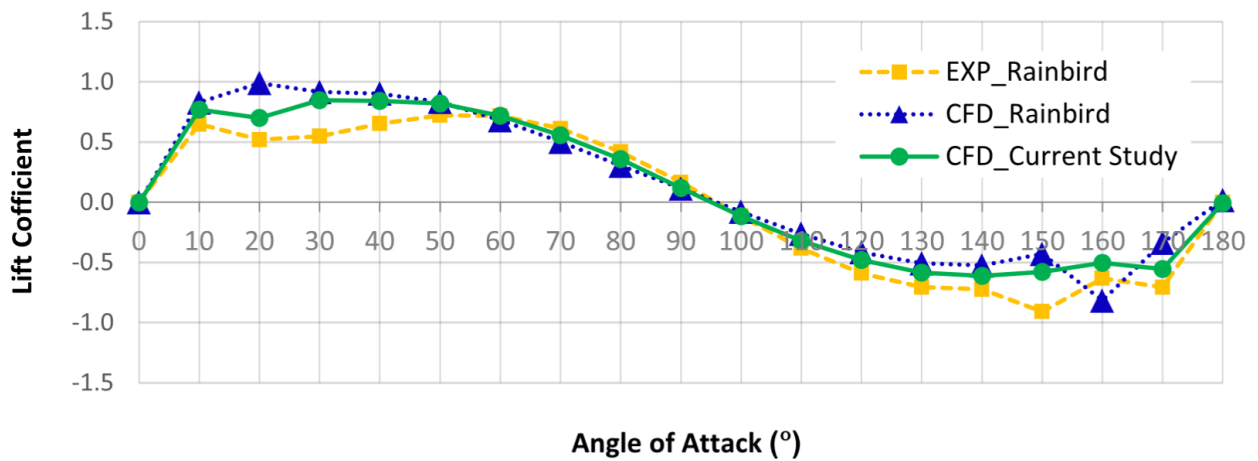
Slika 5.14 Postavke izvješća kojima se dobiva koeficijent uzgona lopatica

Uz zadane referentne vrijednosti duljine tetive lopatice od 0,083 m (slika 5.13) dobiveni su rezultati prikazani na slici 5.15. Ljubičasta linija predstavlja koeficijente uzgona za lopaticu 1 koja se nalazila na poziciji  $0^\circ$  pri definiranju geometrije, narančasta linija su koeficijenti uzgona lopatice 2 početnog položaja  $120^\circ$ , siva linija su koeficijenti uzgona lopatice 2 početnog položaja  $240^\circ$ . Krivulje prate promjenu koeficijenta uzgona prilikom rotacije rotora za 180 stupnjeva. Može se primijetiti cikličnost rezultata. Pri zakretu rotora od  $120^\circ$  lopatica 1 dolazi na početnu poziciju lopatice 2 te budući da se radi o identičnim lopaticama, iznos koeficijenta uzgona im je isti. Istu pojavu pri  $120^\circ$  zakreta rotora je moguće uočiti i za lopaticu 3 koja dolazi na mjesto lopatice 2, te lopaticu 3 koja dolazi na mjesto lopatice 1.

Zbroj krivulja koeficijenata uzgona svake lopatice daje resultantnu krivulju koeficijenata uzgona cijele vjetroturbine označenu žutom bojom na slici 5.15. Resultantna krivulja jako odstupa od krivulje iz literature (slika 5.16). Ovo nepodudaranje vrijednosti ukazuje na pogreške pri rekreaciji simulacije iz literature.



Slika 5.15 Krivulje koeficijenata uzgona



Slika 5.16 Krivulje koeficijenata uzgona iz literature (kopija slike 4.1 radi preglednosti) [1]

## ZAKLJUČAK

Izrađena je CFD analiza strujanja zraka kroz H-Darrieus vjetroturbinu s tri jednoliko razmaknute lopatice NACA 0018 profila. Analiza je provedena na 2D presjeku vjetroturbine na mjestu na kojemu spona lopatica i rotora ne utječu na strujanje zraka. Utjecaj vratila vjetroturbine je uzet u obzir. Domena simulacije je podijeljena na rotirajući dio neposredno uz rotor koji se giba zajedno s njime brzinom vrtnje 68 rad/s te na stacionarni dio okoline vjetroturbine s ujednačenim vjetrom brzine 6 m/s s kojim se postiže uravnoteženo strujanje na rubovima domene. Numerička mreža domene je ugušćena uz rubove lopatica i vratila vjetroturbine te uz rub između stacionarne i rotirajuće domene kako bi preciznije opisali pojave u tom području.

Dobiveni su rezultati strujanja zraka oko rotora za njegovu relativnu rotaciju od  $0^\circ$  do  $180^\circ$  u odnosu na početni položaj, u koracima od  $10^\circ$  kako bi bili usporedivi s rezultatima iz literature. Zbog razmaka lopatica od  $120^\circ$  prva lopatica dolazi na mjesto druge pri zakretu rotora od  $120^\circ$ . Sve pojave na vjetroturbini sa tri jednoliko razmaknute lopatice se mogu percipirati unutar tih  $120^\circ$ . Budući da je provedena simulacija do zakreta  $180^\circ$ , moguće je primijetiti tendenciju ka cikličkim rezultatima. Cikličnost bi bila neupitna simuliranjem pune rotacije rotora od  $360^\circ$ .

Konture magnitude brzina, statičkog i dinamičkog tlaka ove 2D CFD analize su usporedivi s radovima iz literature. Konture su prikazane za relativne pozicije rotora od  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  i  $90^\circ$  u odnosu na početni položaj. Moguće je uočiti pojavu recirkulacijskih zona na različitim lopaticama pri različitim kutevima zakreta rotora. Izračunan je koeficijent uzgona lopatica za intervale od  $10^\circ$  rotacije rotora te je zabilježeno značajno odstupanje resultantnog koeficijenta uzgona u odnosu na rezultate iz literature. Time ova simulacija nije validirana, no ostat će evidentirana kao spomen kompleksnosti zadatka izrade točnih CFD analiza. Velika odstupanja rezultata simulacije su posljedica moguće drugačije definiranih referentnih vrijednosti, postavki simulacije unutar programskog okruženja Ansys Fluent, razlika u definiciji rubnih uvjeta te moguće razlike u načinu mjerenja uzgona.

Validirana CFD simulacija je jak alat koji štedi vremenske, materijalne i financijske resurse pri izradi bilo kojeg aerodinamičkog elementa. Smanjivanje grešaka u simulaciji značajno smanjuje probleme u eksploataciji sustava koje bi se tada morali rješavati skupocjenim doradama ili ponovnom izgradnjom. Velika je stoga važnost procesa dorade provedene simulacije kako bi pokazala što realniju sliku stvarnosti. Ovaj proces je ostavljen kao mogući nastavak istraživanja.

## LITERATURA

- [1] Mahdi Torabi, Asr; Erfan Zal, Nezhad; Faizal, Mustapha; Surjatin, Wiriadidjaja: „Study on start-up characteristics of H-Darrieus vertical axis wind turbines comprising NACA 4-digit seriesblade airfoils“, Energy 112, str. 528-537, 2016 g.
- [2] Kumar, Palanisamy Mohan; Sivalingam, Krishnamoorthi; Narasimalu, Srikanth; Lim, Teik-Cheng; Ramakrishna, Seeram; Wei, He: „A Review on the Evolution of Darrieus Vertical Axis Wind Turbine: Small Wind Turbines“, Journal of Power and Energy Engineering, Vol.7 No.4, April 2019
- [3] Du, L.; Ingram, G; Dominy, R.: „A review of H-Darrieus wind turbine aerodynamic research“,Journal of Mechanical Engineering Science. 233, 23-24
- [4] Möllerström, Erik; Gipe, Paul; Beurskens, Jos; Ottermo, Fredric: „A historical review of vertical axis wind turbines rated 100 kW and above“, Renewable and Sustainable Energy Reviews Volume 105, Pages 1-13, svibanj 2019.
- [5] Kalmar, Kristijan: „Primjena konformnih preslikavanja u aerodinamici“, Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku, 2019.
- [6] S interneta: [https://www.maine.gov/dacf/lupc/projects/windpower/redington/redingtonrevised/Documents/Section05\\_Sound/AWEA\\_Turbine\\_Noise\\_FAQ.pdf](https://www.maine.gov/dacf/lupc/projects/windpower/redington/redingtonrevised/Documents/Section05_Sound/AWEA_Turbine_Noise_FAQ.pdf), rujan 2024.
- [7] S interneta: <https://gwec.net/global-wind-report-2024/>, rujan 2024.
- [8] S interneta: <https://www.siemensgamesa.com/global/en/home/products-and-services.html>, rujan 2024.
- [9] S interneta: <https://youtu.be/EM-gCvhQhPU?si=8zWpGi2V5dSgneoR>, rujan 2024
- [10] S interneta: <https://seatwirl.com/>, rujan 2024
- [11] S interneta: <https://www.elprocus.com/darrieus-wind-turbine-working/>, rujan 2024
- [12] S interneta: <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca0018-il>, rujan 2024
- [13] S interneta: [https://m-selig.ae.illinois.edu/ads/coord\\_database.html](https://m-selig.ae.illinois.edu/ads/coord_database.html), rujan 2024
- [14] S interneta: <https://youtu.be/ldt405jIR0E?si=DBIp4mb5SVVd7di2>, rujan 2024
- [15] Sefidgar, Zahra; Ahmadi Joneidi, Amir; Arabkoohsar, Ahmad: „A Comprehensive Review on Development and Applications of Cross-Flow Wind Turbines“, Danmarks Tekniske Universitet, 2023

- [16] Hussany, Firas Lattef: „Darrieus' Turbine Design on the International Road Basra-Al-Amarah“, European Journal of Engineering and Technology research, Vol. 8 No. 1, 2023
- [17] Adaramola M.: „Wind Turbine Technology Principles and Design“, Apple Academic Press, 2014.
- [18] S interneta: <https://sitn.hms.harvard.edu/flash/2015/the-winds-of-change-are-blowing-new-kite-like-wind-turbine-promises-to-revolutionize-wind-energy/>, rujan 2024
- [19] S interneta: [https://www.energy.gov/eere/wind/articles/wind-farms-future-will-be-more-powerful-and-quieter?utm\\_content=bufferc7d96&utm\\_medium=social&utm\\_source=twitter.com&utm\\_campaign=buffer](https://www.energy.gov/eere/wind/articles/wind-farms-future-will-be-more-powerful-and-quieter?utm_content=bufferc7d96&utm_medium=social&utm_source=twitter.com&utm_campaign=buffer), rujan 2024
- [20] S interneta: <https://www.agilewindpower.com/en>, rujan 2024

## POPIS SLIKA

Slika 1.1 <i>Podjela vjetroturbina s obzirom na položaj osi vratila</i> [17].....	2
Slika 2.1 <i>Tipična vjetroturbina s vodoravnom osi (fotografija autora)</i> .....	3
Slika 2.2 <i>Slikoviti prikaz izvješća Globalnog vijeća za energiju vjetra u 2023. godini</i> [7] .....	4
Slika 2.3 <i>Komponente vjetroturbine s vodoravnom osi</i> [18].....	5
Slika 2.4 <i>Vizualizacija glasnoće vjetroturbine u odnosu na ostale izvore zvuka</i> [19] .....	6
Slika 2.5 <i>Neke izvedbe Savoniusove vjetroturbine</i> [3] .....	7
Slika 2.6 <i>Neke izvedbe Darrieusove vjetroturbine</i> [15] .....	7
Slika 3.05 <i>Plan sila na lopaticu</i> [14].....	13
Slika 3.1 <i><math>\Phi</math>-Darrieus vjetroturbina</i> [15] .....	9
Slika 3.2 <i>H-Darrieus vjetroturbina</i> [1] .....	10
Slika 3.3 <i>Darrieusove vjetroturbine preko 100 kW u svijetu kroz povijest</i> [4].....	11
Slika 3.4 <i>Plutajuća H-Darrieus vjetroturbina</i> [10].....	12
Slika 3.6 <i>Pojava lokalnog vektora brzine zraka</i> [14].....	13
Slika 4.01 <i>Statička aerodinamička karakteristika aeroprofila turbine;usporedba koeficijenata</i> [1] .....	15
Slika 4.02 <i>Nazivi dijelova lopatice</i> [5] .....	16
Slika 4.03 <i>NACA 0018 profil</i> [13].....	17
Slika 4.04 <i>Domena 2D simulacije H-Darrieusove vjetroturbine s 3 lopatice ovisna o polumjeru rotora</i> [1] .....	19
Slika 4.05 <i>Imenovanje dijelova domene</i> .....	20
Slika 4.06 <i>Globalne postavke mreže</i> .....	21
Slika 4.07 <i>Parametri lokalnog ugušćenja mreže uz rubove</i> .....	22
Slika 4.08 <i>Parametri slojeva inflacije</i> .....	22
Slika 4.09 <i>Mreža konačnih elemenata cijele domene</i> .....	23
Slika 4.10 <i>Ugušćena mreža konačnih elemenata oko rotora</i> .....	23
Slika 4.11 <i>Lokalna ugušćena mreža konačnih elemenata oko lopatice</i> .....	23
Slika 4.12 <i>Lokalna ugušćena mreža konačnih elemenata oko napadnog ruba lopatice</i> .....	24
Slika 4.13 <i>Lokalna ugušćena mreža konačnih elemenata oko izlaznog ruba lopatice</i> .....	24
Slika 4.14 <i>Pokazatelj kvalitete mreže „Aspect Ratio“</i> .....	25
Slika 4.15 <i>Pokazatelj kvalitete mreže „Skewness</i> .....	25
Slika 4.16 <i>Pokazatelj kvalitete mreže „Orthogonal Quality“</i> .....	25
Slika 4.17 <i>Pokazatelj kvalitete mreže „Element Quality“</i> .....	25

Slika 4.18 Pokazatelj kvalitete mreže „Maximum Element Edge Length“ .....	25
Slika 4.19 Parametri modela simulacije .....	26
Slika 4.20 Svojstva fluida .....	27
Slika 4.21 Omrežena domena s imenovanim rubnim uvjetima u rješavaču Fluent .....	27
Slika 4.22 Rubni uvjet na ulazu domene .....	28
Slika 5.01 Konture magnitude brzine 0° zakreta rotora.....	29
Slika 5.02 Konture statičkog tlaka za 0° zakreta rotora .....	30
Slika 5.03 Konture dinamičkog tlaka za 0° zakreta rotora .....	30
Slika 5.04 Konture magnitude brzine za 30° zakreta rotora .....	31
Slika 5.05 Konture statičkog tlaka za 30° zakreta rotora .....	31
Slika 5.06 Konture dinamičkog tlaka za 30° zakreta rotora .....	32
Slika 5.07 Konture magnitude brzine za 60° zakreta rotora .....	32
Slika 5.08 Konture statičkog tlaka za 60° zakreta rotora .....	33
Slika 5.09 Konture dinamičkog tlaka za 60° zakreta rotora .....	33
Slika 5.10 Konture magnitude brzine za 90° zakreta rotora .....	34
Slika 5.11 Konture statičkog tlaka za 90° zakreta rotora.....	34
Slika 5.12 Konture dinamičkog tlaka za 90° zakreta rotora .....	35
Slika 5.13 Referentne vrijednosti .....	35
Slika 5.14 Postavke izvješća kojima se dobiva koeficijent uzgona lopatica .....	36
Slika 5.15 Krivulje koeficijenata uzgona .....	37
Slika 5.16 Krivulje koeficijenata uzgona iz literature (kopija slike 4.1 radi preglednosti) .....	37



## POPIS TABLICA

Tablica 4.1 Koordinate točaka koje definiraju NACA 0018 profil.....	17
Tablica 4.2 Dimenzije domene simulacije.....	19

## SAŽETAK

Završni rad pokazuje 2D CFD analizu strujanja zraka kroz H-Darrieusovu vjetroturbinu s vertikalnom osi s tri jednako razmaknute lopatice NACA 0018 profila, upotrebom Ansys programskog paketa. Analiza se provodi za slučajeve relativne rotacije rotora od  $0^\circ$  do  $180^\circ$  od početnog položaja, u koracima od  $10^\circ$ . Ovaj rad obuhvaća prikaz svih koraka izrade simulacije: definiranje geometrije, izrade numeričke mreže, definiranje parametara numeričke analize i grafički prikaz rezultata.

Ključne riječi: Darrieus turbina, VAWT, Fluent, CFD

## **SUMMARY**

This final paper covers a 2D CFD analysis of air flow through the H-Darrieus vertical axis wind turbine with three equally spaced NACA 0018 airfoil blades, using the Ansys computer software package. The analysis is performed for cases of relative rotation of the rotor from  $0^\circ$  to  $180^\circ$  from the initial position, in steps of  $10^\circ$ . This paper includes all steps in the creation of a simulation: defining the geometry, creating a numerical mesh, defining the parameters of the numerical analysis and graphically displaying the results.

Key words: Darrieus turbine, VAWT, Fluent, CFD