

Analiza strujanja kroz Darrieus vjetroturbinu s vertikalnom osi korištenjem komercijalnog rješavača

Hlapčić, Karlo

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:190:241345>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-24**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Prijediplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**Analiza strujanja kroz Darrieus vjetroturbinu
s vertikalnom osi korištenjem komercijalnog rješavača**

Rijeka, rujan 2024.

Karlo Hlapčić

0035208066

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Prijediplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**Analiza strujanja kroz Darrieus vjetroturbinu
s vertikalnom osi korištenjem komercijalnog rješavača**

Mentor: Prof. dr. sc. Zoran Čarija

Rijeka, rujan 2024.

Karlo Hlapčić

0035208066

Rijeka, 12. ožujka 2021.

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

ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Karlo Hlapčić (0035208066)**
Studij: **Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva**

Zadatak: **Analiza strujanja kroz Darrieus vjetroturbinu s vertikalnom osi korištenjem komercijalnog rješavača / Darrieus vertical axis wind turbine flow analysis using commercial software**

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 brzine nastujavanja vjetra i za različite položaje turbine. 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:

Prof. dr. sc. Zoran Čarija

Predsjednik povjerenstva za
završni ispit:

Prof. dr. sc. Kristian Lenić

IZJAVA

Ovom izjavom potvrđujem da sam završni rad izradio samostalno znanjem koje sam stekao tijekom studija na Tehničkom fakultetu u Rijeci uz smjernice mentora te navedene literature.

Karlo Hlapčić

ZAHVALA

Ovim putem se zahvaljujem mentoru prof. dr. sc. Zoranu Čariji na pruženoj prilici tijekom odabira teme iz kolegija Hidraulički strojevi. Isto tako bih se zahvalio i asistentici dr. sc. Ivani Lučin na strpljenju i jasnim smjericama oko pripreme i izrade završnog rada.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. VJETROTURBINE.....	3
2.1. Građa i osnovni sustavi vjetroturbine.....	4
2.2. Podjela vjetroturbina	6
2.3. Vjetroturbine s horizontalnom osi.....	6
2.4. Vjetroturbine s vertikalnom osi.....	7
2.4.1. Aerodinamika vjetroturbina s vertikalnom osi.....	9
2.4.2. Savoniusova vjetroturbina.....	10
2.4.3. Darrieusova vjetroturbina.....	10
2.4.4. H-rotor.....	11
2.4.5. Cikloturbine.....	12
2.4.6. Spiralni rotor	13
3. RAČUNALNA DINAMIKA FLUIDA	14
3.1. Režimi strujanja.....	16
3.2. Modeliranje turbulencije	17
3.3. Numeričke metode u računalnoj mehanici fluida	19
3.4. Numeričke mreže	20
4. ANALIZA STRUJANJA	22
4.1. Geometrija računalne domene.....	23
4.2. Izrada numeričke mreže	24
4.2.1. Dimenzioniranje mreže	25
4.3. Priprema simulacije.....	28
5. REZULTATI SIMULACIJE.....	31
6. ZAKLJUČAK	37
7. LITERATURA	38

8.	POPIS SLIKA	40
9.	POPIS GRAFOVA	41
10.	POPIS TABLICA	42
11.	SAŽETAK	43

1. UVOD

Potreba za količinom proizvedene energije na planetu raste iz godine u godinu. U 2023. godini čak 82% ukupne proizvedene energije je nastalo putem fosilnih goriva. Proizvodnja ukupne energije putem obnovljivih izvora je dosegla rekordnu brojku od 15% od kojih su 8% solarne i vjetroelektrane, ali to je i dalje znatno preniska brojka da bi usporila efekt globalnog zatopljenja zbog sve veće potrebe za energijom. [1]

Energetski prihvatljiv način proizvodnje i realizacije energije sa minimalnim nepoželjnim utjecajem na prirodu i okoliš naziva se zelena energija ili održiva energija. U takvu vrstu energije pribrajamo hidroenergiju, energiju plime i oseke, geotermalnu energiju, energiju biomase te energiju vjetru. Maksimalno iskorištavanje takve energije uz smanjivanje eksploatacije fosilnih goriva je jedini način da se smanji i uspori efekt staklenika kao i emisija CO₂.

Svjetske vlade u zajedničkoj suradnji na godišnjim *summit*-ima analiziraju prethodno donesene odluke te raspravljaju o adekvatnim postupcima ulaganja u infrastrukturu za budućnost kako bi se smanjili učinci globalnog zagrijavanja. Tako su definirani ciljevi za tri scenarija GEC (Globalni energetske i klimatski) Modela. [2]

Tri modela u pitanju sa njihovim ciljevima:

- STEPS (scenarij proklamiranih politika)
- APS (scenarij najavljenih obećanja)
- NZE (scenarij net zero emisija do 2050.)

Scenarij proklamiranih politika analizira energetske sustav i projicira budućnost na temelju trenutačno najavljenih i usvojenih politika koje vlade diljem svijeta planiraju implementirati. Glavni cilj ovog modela je pružiti realnu procjenu kako će svjetske energetske potrebe izgledati ako uspiju.

Scenarij najavljenih obećanja fokusira se na analizu učinaka najavljenih obećanja i ciljeva vezanih uz smanjenje emisija. Ovaj model razmatra kako bi svijet izgledao ako države ispune najavljena obećanja vezana uz klimatsku politiku makar još nisu formalno u provedbi.

Scenarij net zero emisija do 2050. predstavlja najambiciozniji scenarij i predviđa nulte neto emisije stakleničkih plinova do 2050. godine. Ovaj model pretpostavlja globalne potrebe koje

bi dovele do drastičnih smanjenja emisija, implementacije novih tehnologija i transformaciju energetske sustava prema održivim izvorima.

Kako je energija vjetra uz solarnu energiju jedno od najinteresantnijih rješenja u smislu eksploatacije u budućnosti, odabrana je tema s ciljem boljeg razumijevanja rada vjetroturbina. Zbog sve veće popularnosti i razvoja tehnologija izrade vjetroturbina s vertikalnom osi u radu je napravljena simulacija strujanja zraka kroz Darrieusovu vjetroturbinu. Simulacije omogućuju inženjerima da testiraju i usavrše dizajn komponenti, predvide ponašanje vjetroturbina u različitim vremenskim uvjetima kako bi se napravila procjena moguće proizvedene energije. Postavljanjem preciznih uvjeta simulacije predviđa se sigurnost i trajnost komponenti te se radi plan održavanja kako bi se smanjili troškovi.

U drugom poglavlju prikazan je opći pregled vjetroturbina. U tom pregledu predstavljen je temeljni princip rada vjetroturbina i prikazana je glavna podjela uz osnovne karakteristike svakog tipa. U trećem poglavlju prikazana je osnovna ideja računalne dinamike fluida. Opisane su temeljne jednadžbe na kojima se temelji, prikazani su režimi strujanja te je pojašnjeno kako primjena različitih metoda utječe na modeliranje turbulencije. U četvrtom poglavlju predstavljena je izrada simulacije koja je napravljena u programu *Ansys Workbench 2024 R1*. Korištenjem modula *Design Modeler* pripremljena je 2D geometrija turbine kao i cijela računalna domena. Preko modula *Mesher* napravljena je numerička mreža kako bi se precizno opisalo strujanje fluida kroz turbinu. Za izradu i pokretanje simulacije korišten je modul *Fluent* preko kojeg su praćene fizikalne veličine koje će se na kraju rada prikazati i dovesti u direktnu vezu. Za kraj rada donesen je kratki zaključak i osvrt na mogućnosti poboljšanja samog rada.

2. VJETROTURBINE

Vjetar je vektorska veličina i nastaje na području gdje postoji razlika u tlakovima. On struji iz područja višeg tlaka prema području nižeg tlaka i intenzitet mu se povećava s većom razlikom među samim tlakovima. Vjetroturbina je uređaj koji iskorištava snagu vjetra okretanjem lopatica turbine koje proizvode kinetičku energiju, a nakon toga se kinetička energija putem generatora pretvara u električnu energiju. Lopatice rotora moraju zadovoljiti stroge kriterije u smislu same izvedbe kako bi mogle izdržati snagu vjetra i centrifugalne sile. Kada govorimo o izvedbama lopatica govorimo o samom profilu lopatica i napadnom kutu nastrujavanja vjetra za postizanje maksimalne učinkovitosti.

Vjetroelektrana predstavlja područje od više kvadratnih kilometara koja sadrži nizove vjetroturbina. Mogu biti postavljene na kopnu i na moru, ali uvijek s istim ciljem, maksimalnim iskorištavanjem snage vjetra za dobivanje električne energije.



Slika 2.1 Prikaz vjetroelektrane na otvorenom moru [3]

2.1. Građa i osnovni sustavi vjetroturbine

Glavne grupe dijelova vjetroturbine:

- rotor
- pogonski sklop
- električni sustav
- kontrolni sustav
- potporna struktura

Rotor čine lopatice i glavčina (eng. *hub*). Lopatice mogu biti zakrivljene, konusne i sužene. One su pričvršćene na glavčinu te se mogu zakretati i imati krilca. Glavčina ima zupčanike kao dio sustava za zakretanje lopatica (eng. *pitch mechanism*) koji mogu biti aktivirani električno ili pneumatski te omogućavaju zakret lopatica izvan smjera vjetra u svrhu kontrole brzine rotora. Na taj način se amortizira negativan utjecaj rotacije pri brzinama koje nisu povoljne za generiranje električne energije.

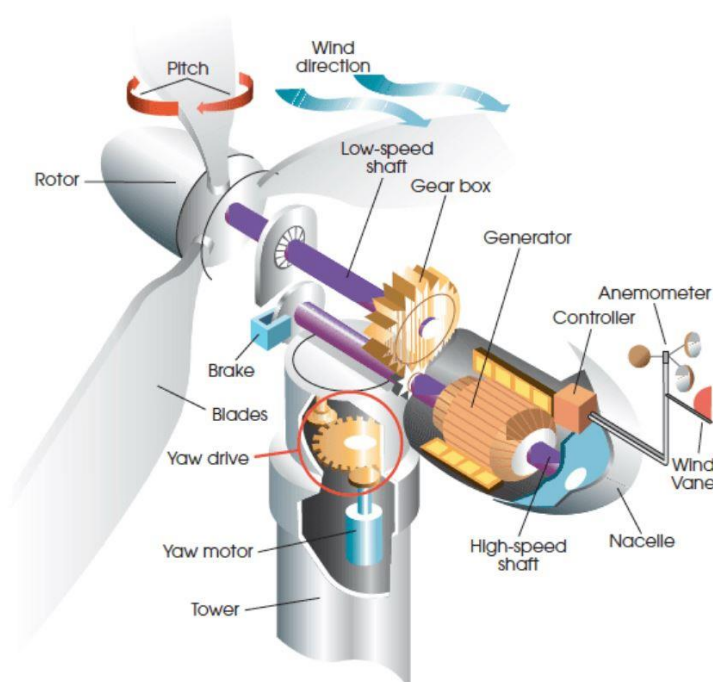
Pogonski sklop se sastoji od niskobrzinske osovine, ležajeva, spojki, mjenjača, visokobrzinske osovine te kočnica. Niskobrzinska osovina ili glavna osovina ima nisku brzinu rotacije rotora sa visokim okretnim momentom. Veličina rotora bitno utječe na momente koji se prenose. Obično je izrađena od čelika jer mora podnijeti jako velika opterećenja. Osnovna zadaća glavne osovine je prijenos momenta s rotora na ostatak pogonskog sklopa. Reakcijska opterećenja se prenose putem ležajeva. Mjenjač je veoma težak i skup dio vjetroturbine, do te mjere da se istražuju mjere izravnih pogona koji bi riješili rad pri nižim brzinama. Mjenjač povezuje niskobrzinsku sa visokobrzinskom osovinom i povećava brzinu rotacije čak i do 60 puta. Moment među osovinama se prenosi spojkom koja također služi za ublažavanje oscilacija momenata prije pretvorbe mehaničke energije u električnu energiju. Kada turbina radi u nepovoljnim uvjetima kao što su prekoračenja graničnih brzina ili pak za potrebe održavanja tu su disk kočnice kako bi se rotor zaustavio.

Sustav za praćenje vjetra (eng. *yaw system*) služi za automatsko pozicioniranje rotora u smjeru vjetra pošto je tada učinkovitost najveća. Radi na principu vodoravnog zakretanja, on uključuje motor za okretanje, a upravlja se pomoću senzora vjetra koji uzima u obzir razliku između orijentacije rotora i smjera vjetra. Pošto se zakreće cijelo kućište s rotorom, prijenosnim sustavom i generatorom ono mora biti postavljeno pomično kako bi došlo do vodoravnog zakreta.

Kada je sve u optimalnom položaju dolazi do aktivacije kočnice koja drži rotor u optimalnom položaju. Stvarno odstupanje smjera vjetra i položaja rotora ne bi trebalo prelaziti granicu od 5%, takvo odstupanje nazivamo kutom zakreta (eng. *yaw angle*). Na vrhu kućišta se nalazi anemometar koji služi za mjerenje jačine vjetra i brzinu strujanja zraka. Ima senzor koji se sastoji od 3 ili 4 čašice oblika šuplje polukugle drugačije poznatog kao Robinsonov križ. Prilikom naleta vjetra jedna od čašica uvijek pruža maksimalni otpor istom strujanju pri čemu dolazi do stvaranja električnog napona mjerenog voltmetrom. Kod mehaničkih tipova prijenos se aktualizira preko vijka dok suvremenije izvedbe funkcioniraju na optoelektričnom načinu rada.

Indukcijski generator pretvara mehaničku energiju u električnu energija. Radi s izmjeničnom strujom pri konstantnoj brzini i potrebni su mu kompenzacijski kondenzatori zbog velike količine jalove snage.

Glavne komponente sustava osim rotora nalaze se u kućištu (eng. *nacelle*) smještenom na vrhu tornja. Kućište ne nosi nikakvo opterećenje, izrađeno je od laganog materijala i služi kao zaštita ostalim komponentama. Tornjevi su obično cijevnih i rešetkastih struktura od cinčanog čelika kako ne bi došlo do negativnih posljedica poput hrđe koja bi znatno naštetila strukturi ovakvih proporcija. Toranj podržava kućište, prenosi statičke i dinamičke sile kao i momente na temelje. Cijevni toranj omogućuje zaštićen pristup komponentama u kućištu. Predstavlja najskuplji dio modernih turbina, a visina samog tornja obično odgovara promjeru rotora. [4]



Slika 2.2. Osnovni dijelovi vjetroturbine [5]

2.2. Podjela vjetroturbina

Glavna podjela vjetroturbina se temelji na iskorištavanju vjetra prema načinu:

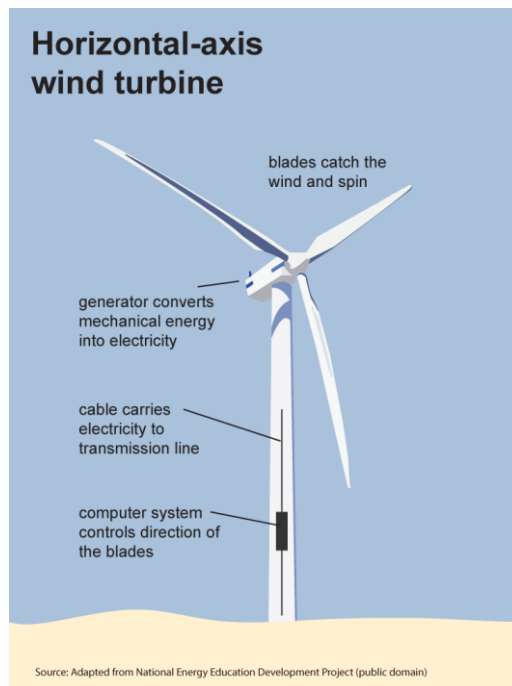
- otpornog djelovanja
- potiska
- kombiniranja oba principa

Ostalu podjelu možemo napraviti:

- prema položaju osi turbinskog kola
- omjeru brzine najudaljenije točke rotora i brzine vjetra
- broju lopatica
- veličini zakretnog momenta
- načinu pokretanja
- iskoristivosti pretvorbe energije u zakretni moment
- načinu okretanja rotora prema brzini vjetra

2.3. Vjetroturbine s horizontalnom osi

HAWT (eng. *horizontal axis wind turbine*) je najzastupljeniji oblik vjetroturbine danas. Rotor u standardnoj praksi ne sadrži više od tri lopatice. Osim broja lopatica glavna razlika je u položaju turbine u odnosu na smjer vjetra. Kod rotacije u smjeru vjetra (eng. *upwind turbine*) glavni cilj je spriječiti turbulencije i smanjenje snage nastale zbog sjene tornja. Kod rotacije niz vjetar (eng. *downwind turbine*) vjetar prvo nastrujava na toranj, a zatim lopatice, ali upravo zbog toga dolazi do varijacija u snazi vjetra prilikom nastrujavanja. Rade pri velikim brzinama, koriste silu uzgona koja se generira kao razlika tlaka između gornjeg i donjeg dijela aeroprofila kako bi ostvarile samu rotaciju rotora.



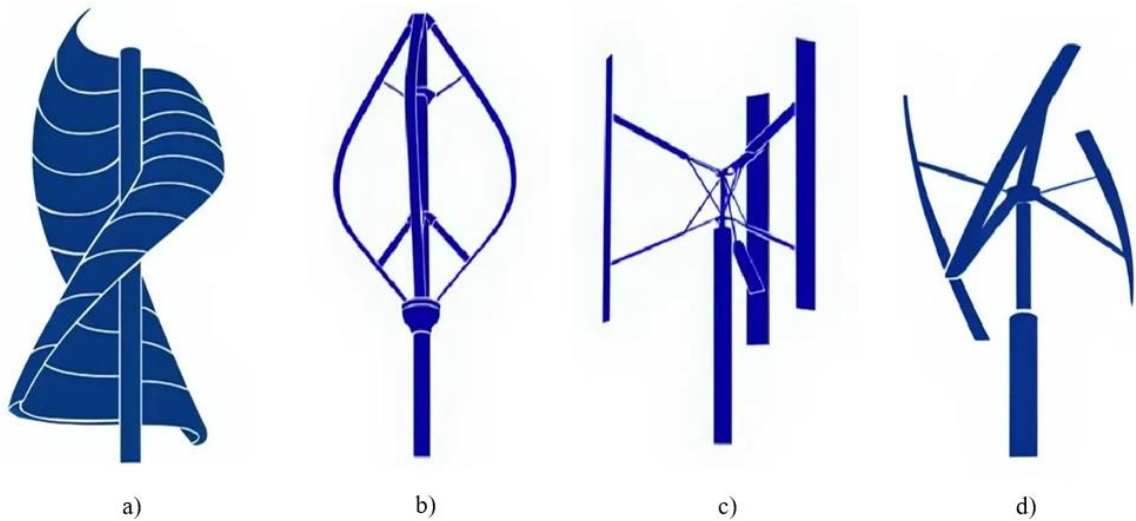
Slika 2.3. Vjetroturbina s vodoravnom osi [6]

Prednosti vjetroturbina s horizontalnom osi leži u visokom kapacitetu proizvodnje električne energije, turbina kapaciteta 2,5 – 3,0 MW može proizvesti oko 6 milijuna kWh. Visoka učinkovitost pretvorbe snage vjetra u električnu energiju, čak i do 50%. Pouzdane su sa veoma razvijenom tehnologijom izrade te zbog svoje veličine lako postižu uvjete optimalnog rada.

Nedostatci leže u transportu, instalaciji i održavanju. Transport i sama instalacija predstavljaju ogromne logističke i tehničke izazove, kod održavanja se javlja problem nepristupačnosti pošto se ključne komponente nalaze na vrhu tornja. Kod projektiranja ovakvih vjetroturbina treba uzeti u obzir stroge regulacije poput minimalne udaljenosti od naseljenog područja te provesti analizu buke kako bi bila u skladu sa zakonom. Predstavljaju i izazov s aspekta vizualnog efekta na okoliš te moraju biti pažljivo dizajnirane, pogotovo lopatice da se smanji rizik udara ptica o njih. Kod vjetroturbina smještenih u moru treba misliti i na morski ekosustav.

2.4. Vjetroturbine s vertikalnom osi

VAWT (eng. *vertical axis wind turbine*) je tip vjetroturbine gdje je glavna osovina rotora u okomitom položaju na smjer strujanja vjetra. U podnožju turbine se nalaze glavni dijelovi kao što su generator i mjenjač. Kod ovakvih turbina nema potrebe za sustavom usmjeravanja jer imaju omnidirekcijski dizajn.

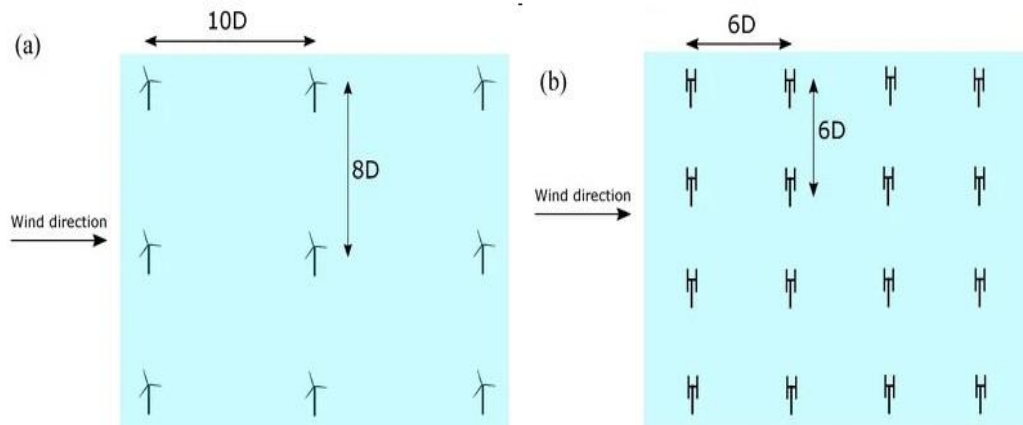


Slika 2.4. Tipovi VAWT: a) Savonius rotor, b) Darrieus rotor, c) Giromill, d) Helical rotor [5]

Prednost vjetroturbina s vertikalnom osi prvenstveno leži u mogućnosti hvatanja vjetra iz svakog smjera i u praktičnosti. Manji broj komponenti potreban je za izradu i održavanje. Naravno inicijalna proizvodnja je puno jeftinija u odnosu na vjetroturbine s horizontalnom osi. Predstavljaju odlično rješenje za potrebe energija kućanstava. Kompaktne su i mogu se lako postaviti u komercijalnim i stambenim sredinama. Proizvode energiju i u nestabilnim vremenskim uvjetima.

Nedostatak ovakvih turbina primarno leži u sposobnosti samopokretanja zbog nižih brzina vjetra uz tlo koji ne stvara dovoljnu rotaciju. Zbog turbulentnog protoka zraka blizu tla doživljavaju značajnu razinu vibracija. Otpor uzrokovan rotacijom lopatica smanjuje učinkovitost u odnosu na vjetroturbine s horizontalnom osi.

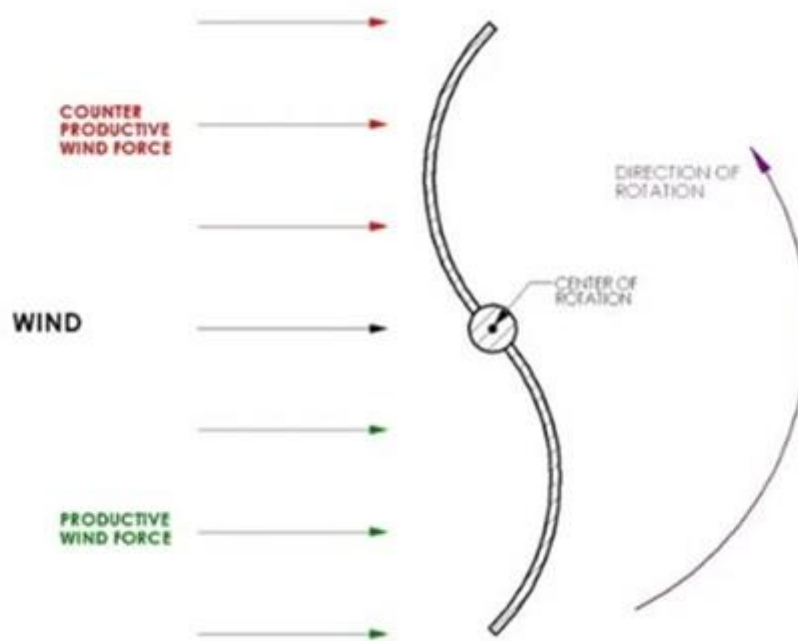
Vjetroturbine oko vertikalne osi jako dobro funkcioniraju zajedno za razliku od tradicionalnih vjetroelektrana koje se sastoje od nizova vjetroturbina oko horizontalne osi. Mogu se postaviti bliže jedna drugoj jer ne dolazi do negativnog efekta gdje vjetar nastrujavajući na lopatice turbine stvara turbulenciju koja može utjecati na performanse nadolazećih turbina (eng. *wake effect*). Zbog relativno malog promjera osovine rotacije je takav efekt minimaliziran ili čak u nekim slučajevima može dovesti do poboljšanih karakteristika rada narednih vjetroturbina, a time omogućava i urbanu realizaciju.



Slika 2.5. Razmještaj vjetroelektrana za (a) (HAWT) i (b) (VAWT), kako bi se smanjio međusobni utjecaj vjetroturbina pretpostavljajući jednoliki smjer vjetra [7]

2.4.1. Aerodinamika vjetroturbina s vertikalnom osi

Prilikom rotacije vertikalne vjetroturbine, javlja se značajan izazov povezan s otporom zraka dijela rotora koji se vraća u početnu poziciju što rezultira gubitkom energije. Upravo to predstavlja veliki nedostatak u odnosu na horizontalne vjetroturbine koje koriste uzgon i s minimalnim otporom postignu optimalne brzine. Isto tako su ograničene zbog pojave vibracija i rezonancija kod instalacija na više stupove. [5, 8]



Slika 2.6. Aerodinamika vjetroturbina s vertikalnom osi [5]

2.4.2. Savoniusova vjetroturbina

Savoniusova vjetroturbina radi na principu otpornog djelovanja uz kombinaciju potiska. Sastoji se od dvije polucilindrične lopatice koje se preklapaju blizu osi rotacije. Zbog jednostavnog dizajna koristi se kada je pouzdanost bitnija od učinkovitosti. Razlog niske učinkovitosti nalazi u tome što polovica turbine stvara pozitivan moment dok se istovremeno druga polovica kreće protiv vjetra i stvara negativan moment. Iskoristivost mu je veća od rotora baziranih samo na otpornom djelovanju dok ne doseže iskoristivost rotora baziranih isključivo na potisak. Glavnu prednost na ostale rotore nalazi u mogućnosti samopokretanja pri nižim brzinama vjetra i tihom radu, a najveći nedostatak prikazuje u količini materijala potrebnog za izradu. [9]



Slika 2.7. Spiralni Savonius rotor [10]

2.4.3. Darrieusova vjetroturbina

Darrieusova vjetroturbina koristi aerodinamičku silu uzgona. Rotori čiji se rad temelji na uzgonu imaju lopatice postavljene pod određenim kutom kako bi omogućile glatko strujanje vjetra preko cijele površine lopatice, odnosno kako bi omogućile stvaranje maksimalne razlike tlaka na različitim stranicama lopatica i kreirale uzgon. Zbog promjenjivog kuta napada stvara se

pulsirajući moment na turbini gdje rezonantna frekvencija može staviti turbinu u područje opasno po lom. Zato su potrebne mehaničke kočnice kako turbina ne bi provela previše vremena u takvom kritičnom stanju. Takvi rotori imaju sposobnost da se okreću i brže od aktualne brzine vjetra, što im povećava učinkovitost i snagu. Koeficijent snage je baziran na mogućnosti prihvata snage vjetra od strane rotora. Glavni nedostaci ovakve turbine su zaštita od ekstremnih uvjeta vjetra te samopokretanje.



Slika 2.8. Darrieus "eggbeater" vjetroelektrana u prijevojima Altamont i Tehachapi u Kaliforniji [11]

2.4.4. H-rotor

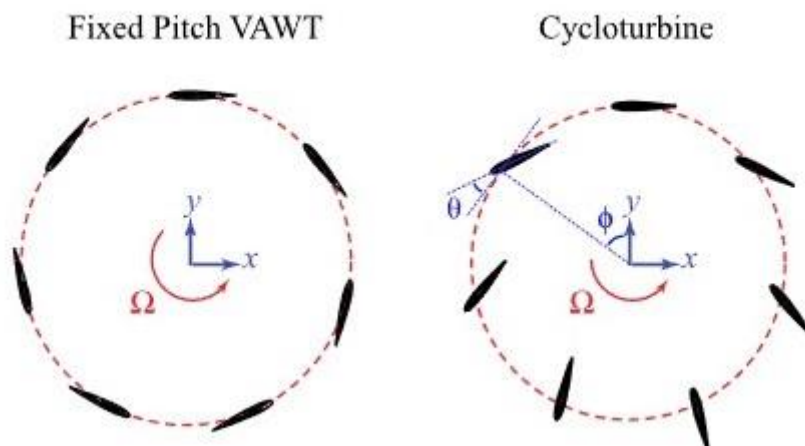
Giromill je vrsta Darrieus vjetroturbine patentirana 1927. godine uz još nekoliko varijacija vertikalnih aeroprofila, ali izvedba nije naišla na široku primjenu u praksi. Tek nedavno je došlo do razvoja modernih giromill modela poznatijih kao H-rotor sa ultra jakim i laganim materijalima lopatica koji bi izdržali velika naprezanja. Takvi rotori sadrže dvije ili tri lopatice koje su spojene sa rotorom preko horizontalnih nosača. Izgradnja Gorimilla je jeftinija i sama izvedba je lakša za izgradnju no potreban mu je snažan, turbulentan vjetar ili motor za pokretanje i nije učinkovit kao standardna Darrieusova turbina. [12]



Slika 2.9. Giromill / H-rotor [13]

2.4.5. Cikloturbine

Cikloturbina je jedna od izvedbi Darrieus vjetroturbine. Kod cikloturbine su sve lopatice montirane tako da se mogu rotirati oko vlastite osi. Takav dizajn omogućava lopaticama da se pozicioniraju u povoljan položaj u odnosu na smjer vjetra i ostvaruju konstantan moment u širokom rasponu napadnih kuteva, tako cikloturbina s tri ili četiri lopatice može ostvariti gotovo pa stalan moment tijekom kompletne rotacije rotora. Za ostvarivanje povoljnog kuta lopatica potreban je senzor vjetra zajedno sa mehanizmom koji je veoma kompleksan i težak. [14]



Slika 2.10. Usporedba shema VAWT s fiksnim nagibom i cikloturbinom (varijabilni nagib) [14]

2.4.6. Spiralni rotor

Spiralni rotori (eng. *helical rotor*) su vrsta vjetroturbina oko vertikalne osi čije lopatice tvore heliks ili spiralu oko vertikalne osovine. Zbog spiralnog dizajna dolazi do ravnomjerne raspodjele momenta tijekom cijele rotacije čime je smanjen utjecaj destruktivnih pulsacija. Lopatice mogu hvatati vjetar iz svih smjerova pa nemaju potrebu za složenim mehanizmom za zakret lopatica kao što je slučaj kod cikloturbina.



Slika 2.11. Spiralni rotor "Qr6" [15]

3. RAČUNALNA DINAMIKA FLUIDA

Računalna dinamika fluida (eng. *Computational Fluid Dynamics (CFD)*) je grana znanosti u kojoj se korištenjem računala rješavanjem jednažbi očuvanja mase, količine gibanja i energije dobiva detaljniji uvid u karakteristike toka tekućina i plinova. Fluidi su svuda oko nas i kroz CFD možemo analizirati, razumjeti i predvidjeti strujanje fluida. Temperaturu, tlak, brzinu, gustoću ili neka od drugih svojstva fluida ne bi bilo moguće analizirati i primijeniti u širokom spektru inženjerskih problema bez računalne dinamike fluide.

Prilikom rješavanja toka fluida prvenstveno je potrebno odrediti primarnu metodologiju rješavanja, odnosno koje će se temeljne jednažbe rješavati. Na taj način se napravi uža selekcija računalnih pristupa, pod pretpostavkom pristupa kontinuuma koji je najčešći. Prvo je potrebno odrediti domenu, u većini slučajeva je to CAD model u pitanju. Zatim je potrebno kreirati numeričku mrežu kako bi se ta domena razdijelila na striktno definirane ćelije. Nakon toga se na računalu rješava diskretizirana verzija temeljnih jednažbi fluida unutar svake ćelije.

Kretanje fluida nije intuitivna pojava i zato temeljne jednažbe CFD-a omogućuju razumijevanje nepredvidive prirode fluida. Navier-Stokesove jednažbe, razvijene sredinom 19. stoljeća, nazvane prema Claude-Louis Navieru i Georgeu Gabrielu Stokesu parcijalne su diferencijalne jednažbe koje služe kao osnova za razumijevanje mehanike fluida. Koriste se za modeliranje svakog oblika strujanja fluida i temeljene su na jednažbama očuvanja mase, količine gibanja i energije. [16]

Prva jednažba je jednažba kontinuiteta tj. jednažba očuvanje mase. Ova jednažba govori da masa određenog volumena fluida mora ostati konstantna osim ako ne postoji priljev ili odljev mase:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (3.1)$$

gdje je:

ρ - gustoća fluida [kg/m³]

t – vrijeme [s]

u – vektor brzine [m/s]

∇ – operator gradijenta

Druga jednadžba je jednadžba očuvanja količine gibanja tj. Drugi Newtonov zakon. Jednadžba količine gibanja govori da je zbroj vanjskih sila koje djeluju na fluid jednaka brzini promjene količine gibanja unutar volumena fluida. Za nestlačiv fluid s konstantnom viskoznošću vrijedi:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u = -\frac{\nabla p}{\rho} + \nu \nabla^2 u + f_b \quad (3.2)$$

gdje je:

p - statički tlak [N/m²]

ν - viskoznost [Ns/m²]

f_b – vanjska sila [N/m³]

U vanjske sile spada i gravitacija koja je definirana kao produkt mase i gravitacijskog ubrzanja. U kontekstu dinamike fluida ove sile se preračunavaju i izražavaju kao sile po jedinici volumena.

Treća jednadžba je jednadžba očuvanje energije, ona navodi da promjena ukupne energije fluida mora biti jednaka energiji dodanoj ili uklonjenoj iz sustava.

$$\frac{\partial(\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u h_{tot}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (u \cdot \tau) + S_E \quad (3.3)$$

gdje je:

h_{tot} - ukupna entalpija [J/kg]

λ - toplinska vodljivost [W/mK]

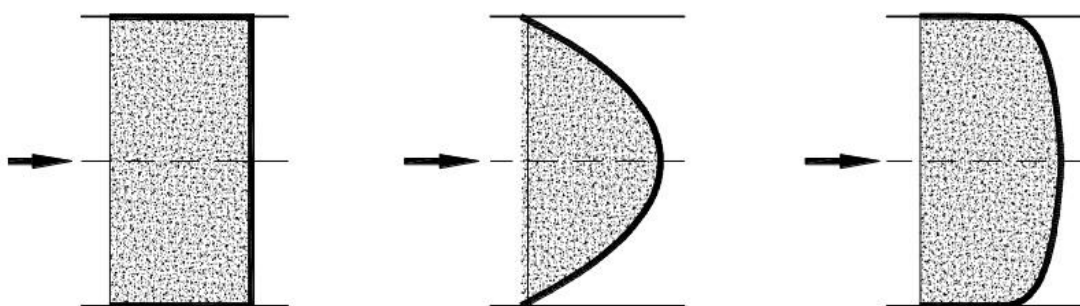
T - temperatura [K]

S_E - vanjski izvori energije / snaga [W/m³]

$$\nabla \cdot (u \cdot \tau) - \text{viskozni rad [W/m}^3\text{]}$$

3.1. Režimi strujanja

Strujanje realnog – viskoznog fluida možemo kategorizirati kao laminarno, prijelazno i turbulentno strujanje. Laminarno strujanje je strujanje kod kojeg se čestice fluida gibaju po glatkim putanjama u infinitezimalno tankim laminama (slojevima), koji klize mirno jedan po drugom. Turbulentno strujanje nastaje zbog nepravilnog kaotičnog gibanja čestica fluida s jakim fluktuacijama brzine u svim točkama strujnog polja. [17, 18]



Slika 3.1. Idealan, laminaran i turbulentan oblik profila brzine [18]

Tijekom analize strujanja Reynolds je primijetio da prilikom promjene brzine strujanja fluida dolazi do prijelaza iz laminarnog u turbulentno strujanje te je tada formulirao bezdimenzijsku značajku nazvanu Reynoldsov broj.

$$Re = \frac{\rho u l}{\mu} \quad (3.4)$$

gdje je:

ρ - gustoća fluida [kg/m³]

u - brzina protoka [m/s]

l - duljina [m]

μ - dinamički viskozitet fluida [Ns/m²]

3.2. Modeliranje turbulencije

Turbulencija nastaje kada gradijenti tlaka ili brzina postanu dovoljno veliki da nadvladaju viskozne sile koje žele zadržati glatkoću strujanja. Turbulencija je složen i kaotičan fenomen kod tokova fluida. Takvu pojavu karakterizira nepredvidivo gibanje fluida što otežava njeno razumijevanje i modeliranje. Dolazi do pojave vrtložnih gibanja i njihovog razbijanja gdje se prenosi energija. Zbog širokog razmjera gibanja dolazi do disipacije kinetičke energije u toplinu čak i na najnižim razinama, samim time je potrebno više energije za održavanje turbulentnog toka. Nastaje prije visokim Reynoldsevim brojevima nakon prelaska kritične vrijednosti. Ta vrijednost može varirati ovisno geometriji i uvjetima strujanja ali za cijevi se kao kritična vrijednost navodi $Re = 2300$.

DNS (eng. *Direct Numerical Simulation*) predstavlja kompletno u prostoru trodimenzionalno i o vremenu ovisno rješavanje Navier-Stokesovih jednadžbi i jednadžbi očuvanja i ravnoteže. Predstavlja jako zahtjevan i trenutno neupotrebljiv proračun, razvojem paralelnih računala sa većim memorijskim kapacitetom će se omogućiti uporabljivost ovakvog pristupa.

LES (eng. *Large Eddy Simulation*) ili modeliranje velikih vrtloga predstavlja postupak gdje se veliki vrtlozi računaju numerički, a mali vrtlozi koji se nalaze izvan dometa numeričke mreže se modeliraju matematički. Takav pristup se vodi pretpostavkom da veliki vrtlozi imaju direktnu poveznicu s numeričkim rubnim uvjetima i su oni glavni nosioci Reynoldsovih naprezanja. Baš zbog matematičkog modeliranja manjih vrtloga potrebna je grublja mreža u odnosu na DNS i znatno smanjuje računalne potrebe za provođenje simulacije.

RANS (eng. *Reynolds Averaged Navier Stokes*) su najpopularniji modeli za rješavanje praktičnih inženjerskih problema povezanih s turbulencijom a zasnovani su na tzv. Reynoldsovim usrednjenjima, najčešće usrednjenjima u vremenu. Primjena je mnogo veća čisto zbog proračunske zahtjevnosti DNS i LES modela. Reynoldsovo usrednjenje predstavlja simplifikaciju kojom se gubi mnogo informacija vezanih za Navier-Stokesove jednadžbe. Najkorišteniji pristupi su tzv. dvojednadžbeni modeli od kojih su najpoznatiji $k - \varepsilon$ i $k - \omega$. Takvi modeli rješavaju jednadžbe turbulentne kinetičke energije k i disipacije turbulentne kinetičke energije ε odnosno specifične brzine disipacije ω . Ova dva modela uz svoje varijacije predstavljaju osnovu velikog broja komercijalnih rješavača na području računalne dinamike fluida.

$k - \varepsilon$ modeli proizlaze iz Navier-Stokesovih jednadžbi za nestlačivo strujanje fluida gdje je k turbulentna kinetička energija koja se definira izrazom

$$k = \frac{1}{2} \sum_i \overline{(u_i')^2} \quad (3.5)$$

a disipacija kinetičke energije ε definira se kao

$$\varepsilon = \frac{\nu}{2} \sum_{i,j} \overline{\left(\frac{\partial u_i'}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j'}{\partial x_i} \right)^2} \quad (3.6)$$

Dvojednadžbeni model $k - \varepsilon$ se sada može raspisat jednadžbom ravnoteže turbulentne energije

$$\frac{\partial k}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(C_k \frac{\partial k}{\partial x} \right) - \varepsilon \quad (3.7)$$

i jednadžbom ravnoteže disipacije turbulentne energije

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(C_\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) - U \quad (3.8)$$

gdje je:

C_k - koeficijent izmjene turbulentne energije

C_ε - koeficijent izmjene disipacije turbulentne energije

U - brzina homogenizacije disipacije

$k - \varepsilon$ modeli daju bolja rješenja za područja udaljenija od stijenke dok su $k - \omega$ modeli predviđeni za područja u blizini stijenke. SST (eng. *Shear Stress Transport*) model daje kombinaciju prethodno spomenutih modela. [18, 19, 20]

3.3. Numeričke metode u računalnoj mehanici fluida

Numeričke metode su alati koji omogućavaju rješavanje jednadžbi postavljenih RANS modelima u računalnoj dinamici fluida. RANS modeli definiraju potrebne jednadžbe za modeliranje turbulentnog toka, dok numeričke metode osiguravaju da te jednadžbe budu riješene na računalno učinkovit način. Kombinacija RANS modela i numeričkih metoda omogućuje simulaciju kompleksnih turbulentnih tokova u stvarnim inženjerskim primjenama.

SIMPLE (eng. *Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*) je iterativni postupak rješavanja Navier-Stokesovih jednadžbi. Ova metoda najprije koristi početnu pretpostavku za polje tlaka, a zatim to isto polje koristi za rješavanje komponenti brzine. Na kraju koristi jednadžbu kontinuuma za izračune korekcija kojom se ažurira polje tlaka i brzine. Na ovom principu SIMPLE metoda rješava problem spregnutog strujanja tlaka i brzine u nestlačivim tokovima. Prednosti ove metode leže u relativno jednostavnoj implementaciji i širokom području primjene. S druge strane jako sporo konvergira posebice kod složenijih problema i nailazi na poteškoće kod nestabilnih tokova.

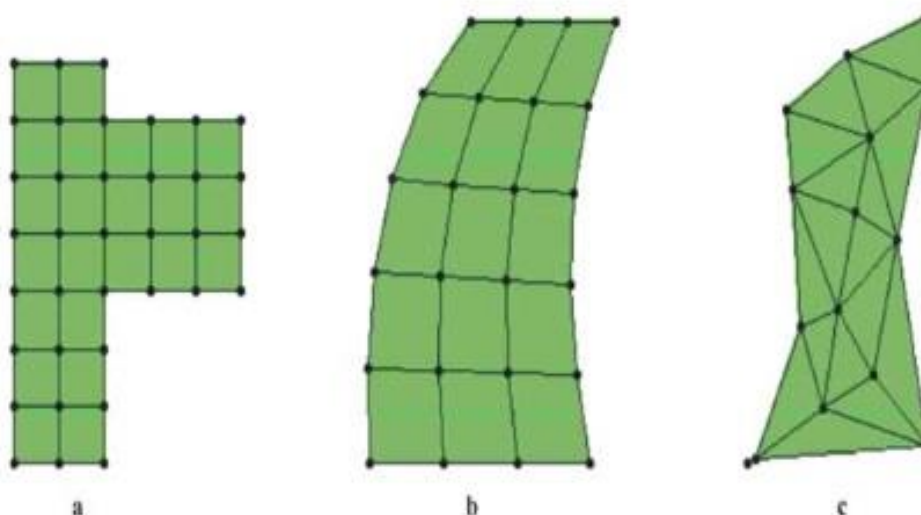
Coupled metode predstavljaju nadogradnju u odnosu na SIMPLE metodu zbog simultanog rješavanja jednadžbe gibanja i kontinuuma u sklopu jednog velikog sustava jednadžbi. Ovdje se svi nepoznati parametri poput tlaka i brzine rješavaju u istom koraku. Pokazuje bolje performanse u brzini konvergencije, naročito kod složenijih problema, isto tako se bolje snalazi s problemima brzih promjena. Ova metoda je složenija, kompliciranija za implementaciju i zbog simultanog rješavanja cijelog sustava zahtijeva veću memoriju i procesorsku snagu.

PISO (eng. *Pressure-Implicit with Splitting of Operators*) je poboljšanje SIMPLE metode posebno dizajnirana za rješavanje nestacionarnih problema. Bazirana je na više faza korekcija tlaka u svakom vremenskom koraku što rezultira bržom konvergencijom rješenja i omogućava rješavanje problema s velikim vremenskim promjenama. Njezine prednosti leže u postizanju brže konvergencije za vremenski promjenjive tokove uz smanjeni broj iteracija za postizanje točnosti. Zbog potrebnih korekcija je složenija za primjenu u usporedbi sa SIMPLE metodom i zahtijeva više računalnih operacija što produljuje ukupno vrijeme simulacije.

Uz ove tri osnovne metode tu su još SIMPLEC metoda, Lattice Boltzmann metoda (LBM) koja predstavlja alternativnu metodu rješavanja diskretizirane Boltzmannove jednadžbe za simulaciju tokova fluida na mikroskopskoj razini te Vortex metoda koja koristi simulaciju tokova s dominantnim vrtložnim strukturama. [18, 19, 20]

3.4. Numeričke mreže

Numeričke mreže dijele domenu na manje diskretne elemente tzv. ćelije (eng. *cell*) ili elemente. Svaka ćelija se sastoji od čvorova (eng. *nodes*) gdje se definiraju i računaju vrijednosti fizikalnih veličina poput brzine, tlaka i temperature. Omogućuju precizno modeliranje i simulaciju fizičkih procesa u računalnim simulacijama. Kvaliteta izrade i vrsta mreže imaju izniman utjecaj na učinkovitost i točnost numeričkih rješenja. Njihovo pravilno generiranje je ključno za dobivanje pouzdanih rezultata. Dvodimenzijske numeričke mreže mogu se klasificirati prema različitim kriterijima: regularne, neregularne; strukturirane, nestrukturirane; trokutaste, mreže četverokuta, hibridne mreže trokuta i četverokuta te poligonske mreže.[21]



Slika 3.2. Neki tipovi dvodimenzijske numeričke mreže: a.) regularna ortogonalna; b.) neregularna strukturirana; c.) nestrukturirana [21]

Strukturirane mreže se sastoje od pravilno raspodijeljenih uniformnih ćelija. U 2D su to najčešće kvadrati ili pravokutnici, a kocke u 3D mrežama. Ovakve mreže se lako programiraju i jednostavno izračunavaju susjedne točke. Imaju niže zahtjeve na računalnu memoriju i vrlo su učinkovite kod standardnih geometrija. Ne koriste se kod složenih geometrija i nepravilnih domena.

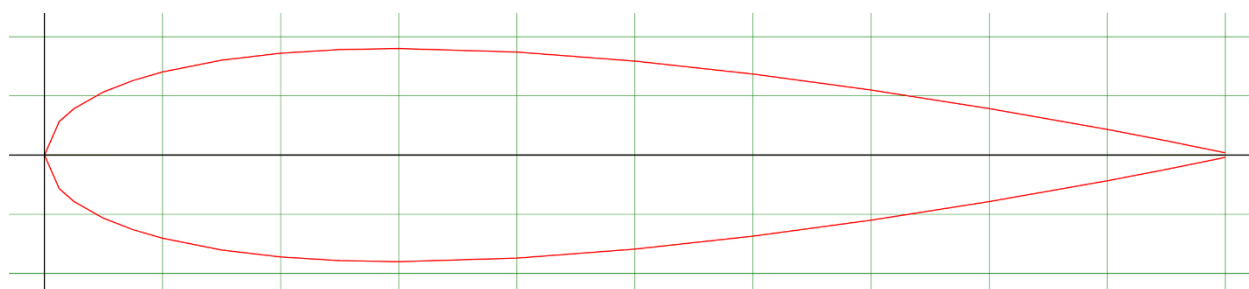
Nestrukturirane mreže se sastoje od ćelija nepravilnog oblika. Za 2D mreže to su trokuti, a kod 3D mreža tetraedri. Upravo takve ćelije omogućavaju bolju prilagodbu složenim geometrijama. Teže ih je integrirati i zahtijevaju više memorije i vremena u odnosu na strukturirane mreže.

Hibridne mreže predstavljaju kombinaciju strukturiranih i nestrukturiranih mreža te se koriste za optimizaciju karakteristika u domenama. Prilagodljive su složenim geometrijama uz opciju zadržavanja prednosti strukturiranih dijelova mreže. Predstavljaju izazov za generiranje i upravljanje.

Mreže mogu biti generirane ručno, automatski pomoću softvera na temelju geometrije te adaptivno gdje se mijenja veličina elemenata u područjima visokih gradijenata fizikalnih veličina.

4. ANALIZA STRUJANJA

U ovom radu je simulacija pripremljena prema istraživanju iz članka [22]. Preuzete su vrijednosti i metodologija izrade numeričke mreže kako bi se napravila usporedba rezultata koeficijenata uzgona u odnosu na kut napada. NACA aeroprofil se koriste u simulacijama vjetroturbina jer pružaju dobro proučene i standardizirane oblike poprečnih presjeka koji su ključni za optimizaciju aerodinamičkih performansi lopatica vjetroturbina. Poznata aerodinamička svojstva poput koeficijenata uzgona i otpora olakšava njihovu primjenu u numeričkim simulacijama. Preuzete vrijednosti aeroprofila su postavljene na duljinu tetive od 1 m. Pošto su dimenzije stvarnih lopatica vjetroturbina znatno veće od standardnih aeroprofila skaliranjem se prilagođavaju specifičnim dimenzijama i radnim uvjetima turbine. Za potrebe ove simulacije odabran je NACA0018 aeroprofil. Kod NACA serije sve četiri znamenke pokazuju na određene karakteristike aeroprofila. Prva dva broja su „00“ što govori da je aeroprofil simetričan i da nema nikakve zakrivljenosti. Druga dva broja, u ovom slučaju „18“ ukazuju na maksimalnu debljinu aeroprofila iskazanu kao postotak duljine tetive (eng. *chord length*). Zbog svoje simetričnosti se koristi u situacijama gdje je potreban balans između uzgona i otpora u oba smjera strujanja zraka. Profil je deblji u sredini i sužava se prema rubovima što mu daje prednost nad tanjim aeroprofilima u smislu čvrstoće i otpornih karakteristika.



Slika 4.1. Izgled NACA0018 aeroprofila [23]

Za potrebe simulacije bilo je potrebno skalirati dužinu tetive na 83 mm kako bi se prilagodila dimenzijama ispitivane domene. To je napravljeno pomoću programa *Excell* i nakon toga je sve spremno za izradu geometrije. S obzirom da se radi o simuliranju strujanja oko turbine koja ima nepromjenjiv poprečni presjek po visini, napravljeno je pojednostavnjenje i napravljena je 2D geometrija turbine. 3D model i mreža bi dali puno detaljniju analizu strujanja ali se izbjegavaju s ciljem očuvanja računalnih resursa. Tijekom postavljanja glavnih teorija i

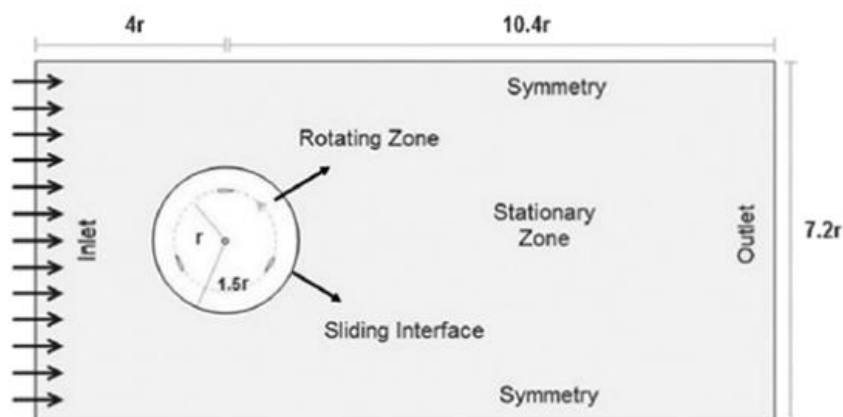
predviđanja analize strujanja praćenjem osnovnih fizikalnih veličina na lopaticama, cijeloj turbini ili pak dijelovima domene možemo dobiti detaljan uvid u ponašanje stvarnog modela u zadanim uvjetima strujanja fluida. Upravo na taj način pomoću CFD analize praćenjem fizikalnih veličina poput uzgona, otpora, kutne brzine i mnogih drugih na jednoj lopatici turbine mogu se dobiti detaljnija razumijevanja ponašanja cijele turbine.

Tablica 4.1. Podaci o geometriji za analiziranu vjetroturbinu [22]

Aeroprofil	NACA0018
Broj lopatica	3
Dužina tetive [mm]	83
Duljina lopatice [mm]	1000
Promjer osi rotora [mm]	40
Radijus turbine [mm]	375
Moment tromosti rotora [kgm ²]	0.018

4.1. Geometrija računalne domene

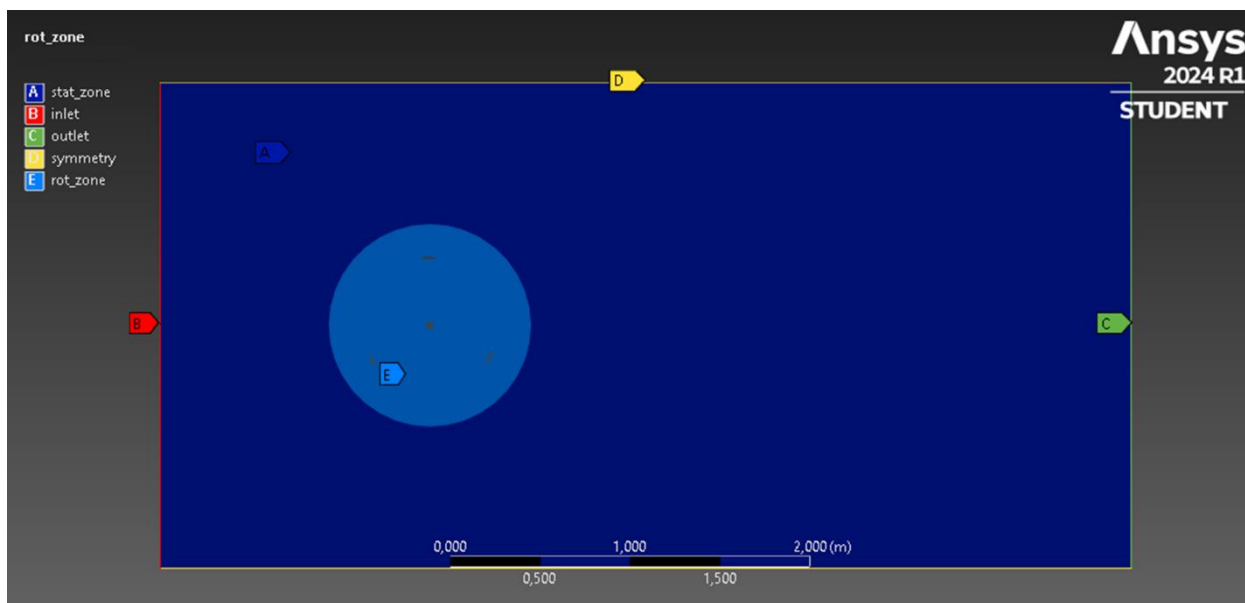
Računalna domena je modelirana sa ciljem da se omogući potpuni razvoj strujanja kroz nju. Domena i potpuna geometrija turbine napravljena je u *Design Modeleru*. Sastoji se od rotacijske i stacionarne domene. Duljina računalne domene, odnosno stacionarne domene modelirana je sa 5400 mm, dok je širina domene 2700 mm. Rotacijska domena smještena je na 1500 mm od ulaza, odnosno 3900 mm od izlaza te je postavljena na 1350 mm od svakog zida.



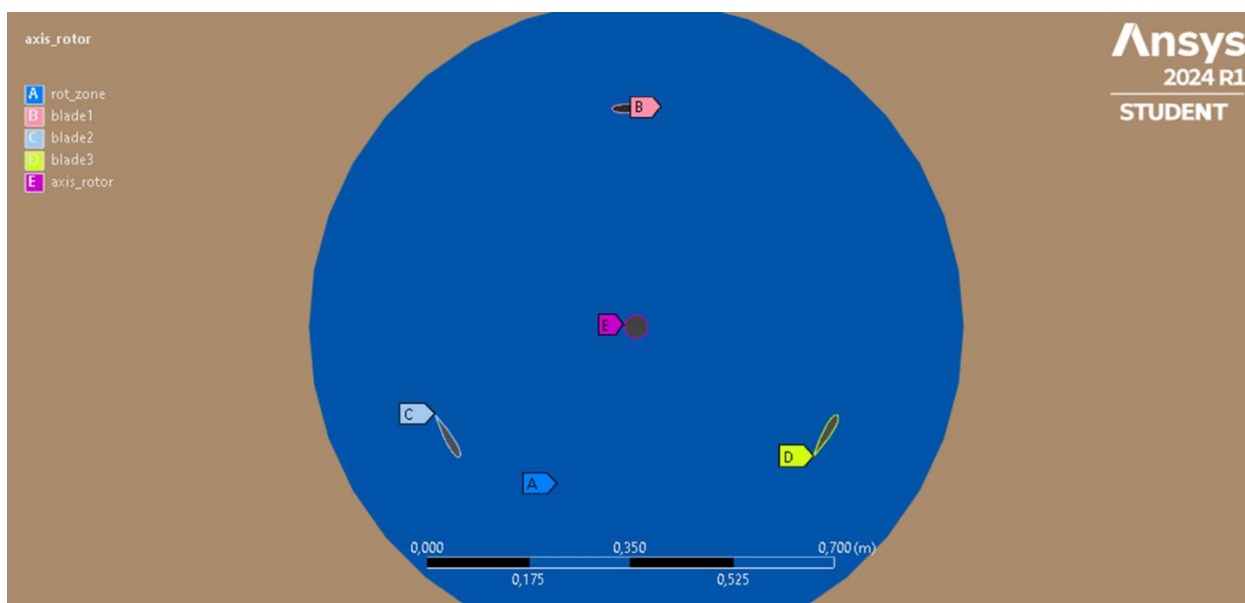
Slika 4.2. Geometrijski opis računalne domene [22]

4.2. Izrada numeričke mreže

Nakon što je izrađena geometrija, ubačena je u *Mesh* gdje su postavljena osnovna svojstva mreže. Prvo treba postaviti imenovane selekcije (eng. *Named Selection*) koje su prikazane na slici 4.3 te slici 4.4.



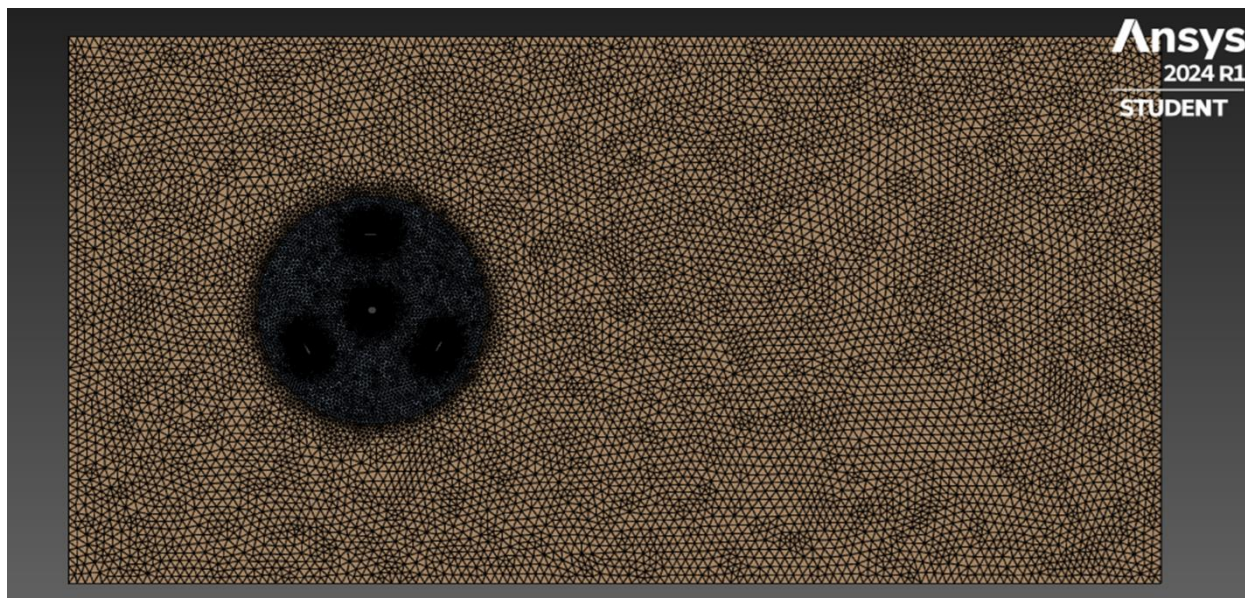
Slika 4.3. Prikaz rubnih uvjeta računalne domene kao i granica stacionarne i rotacijske domene



Slika 4.4. Prikaz imenovanih selekcija unutar rotacijske zone

4.2.1. Dimenzioniranje mreže

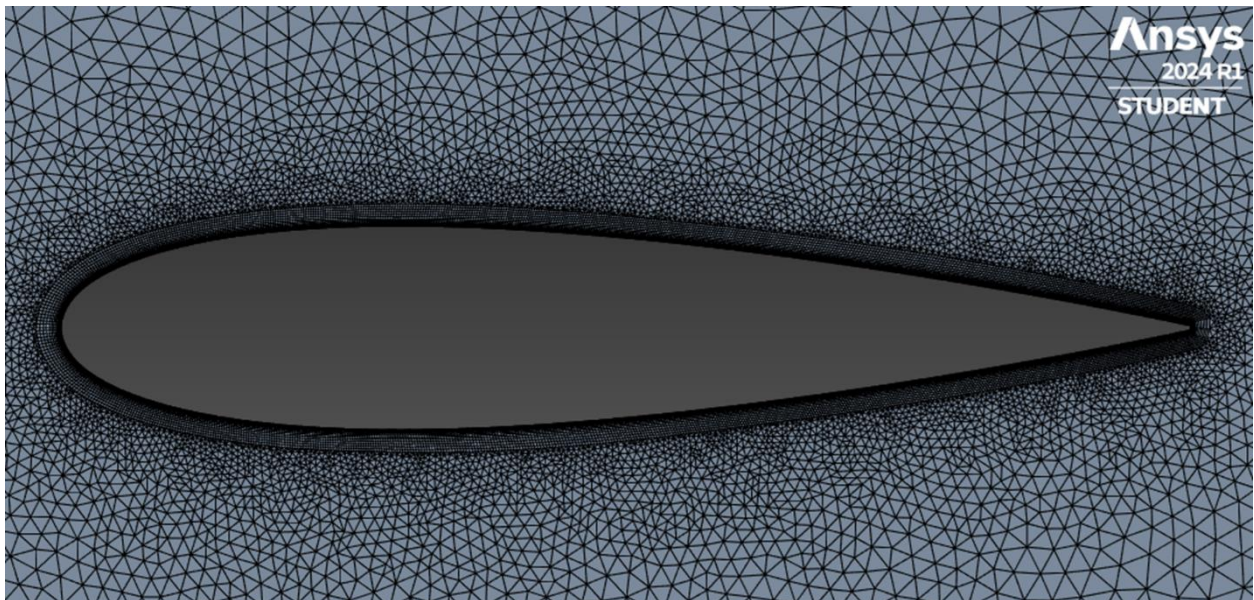
Nakon generiranja osnovne mreže definiraju se postavke *Fluent* rješavača. Globalna maksimalna veličina mreže na površinama je ostavljena na 0,302 m.



Slika 4.5. Generirana mreža na temelju koje je napravljena analiza strujanja

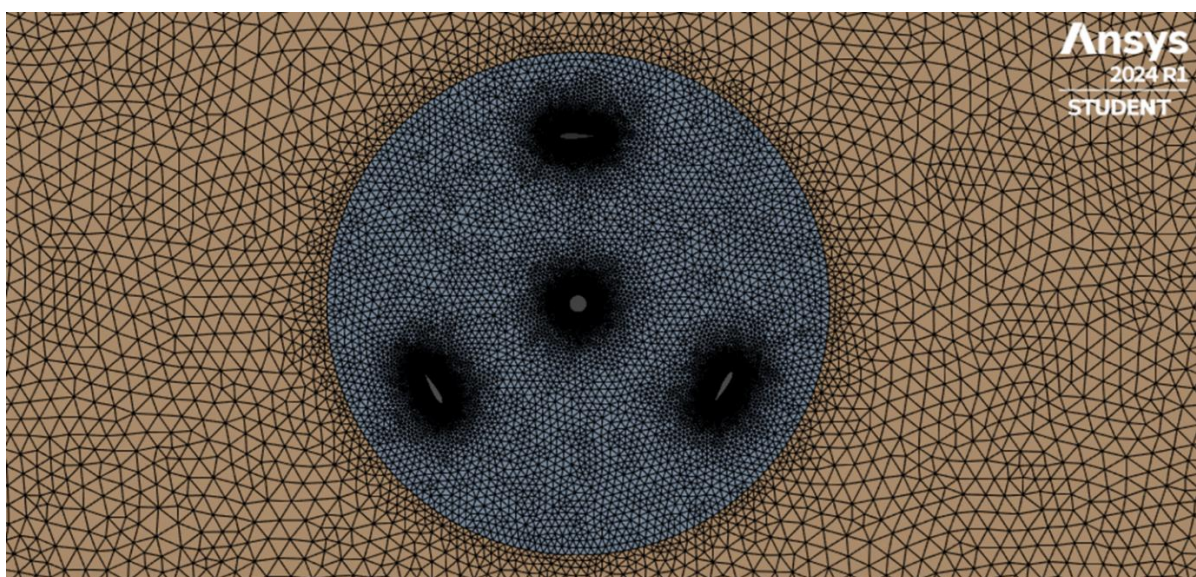
Kako bi se točnije opisalo strujanje zraka kroz turbinu potrebno je ugustiti mrežu oko rubova lopatica. To se radi uz postavljanje veličine mreže na rubu (eng. *Edge Sizing*) kako bi se kontrolirala raspodjela i gustoća elemenata duž rubova geometrije ili osigurao glatki prijelaz između dva područja. Veličina elementa oko prethodno navedenih rubova je postavljena na $1,8 \times 10^{-4}$ m, kut zakrivljenosti (eng. *Curvature Normal Angle*) je postavljen na 12° za bolje praćenje složene zakrivljene geometrije dok je stopa rasta (eng. *Growth Rate*) nepromijenjena sa vrijednošću od 1,1.

Korištenjem naredbe za stvaranje inflacije (eng. *Inflation*) stvorena je struktura tankih slojeva mrežnih elemenata kako bi se precizno modelirao granični sloj gdje se brzina fluida drastično mijenja. Sa debljinom prvog sloja inflacije (eng. *First Layer Thickness*) kreiran je sloj najbliže traženoj površini koji je $2,8 \times 10^{-5}$ m. Maksimalnim brojem slojeva (eng. *Maximum Layers*) modeliran je prijelaz iz graničnog sloja u slobodno strujanje gdje se brzine smanjuju. Maksimalni broj slojeva postavljen je na 15 uz stopu rasta od 1,2. Rezultati inflacije oko lopatice vidljivi su na slici 4.6.



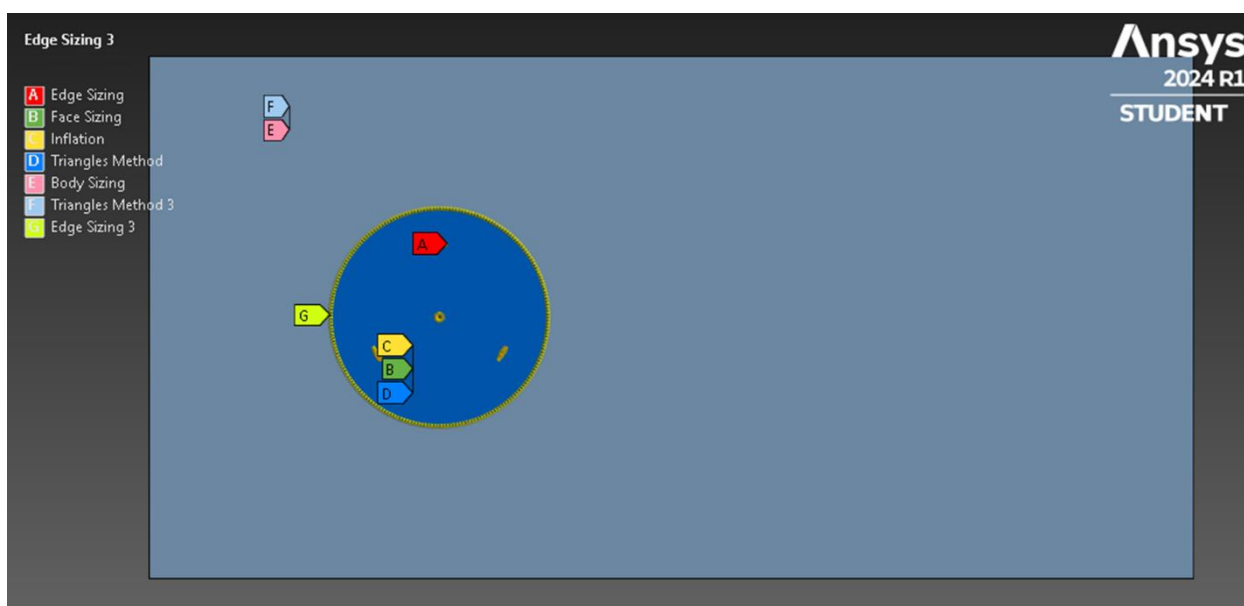
Slika 4.6. Izgled mreže oko lopatice nakon postavljanja veličine mreže na rubu i inflacije

Isto tako je potrebno ugustiti mrežu u rotacijskoj zoni gdje se nalazi sama turbina kako bi se dobili točniji rezultati strujanja. Za cijelu rotacijsku domenu je postavljena veličina mreže na površini (eng. *Face Sizing*) uz veličinu elemenata od 0,017 m, stopa rasta i kut zakrivljenosti su ostavljeni prema prethodno postavljenim osnovnim postavkama. Isto tako je i postavljena metoda trokuta u rotacijskoj domeni (eng. *Triangles Method*) koja koristi trokutaste elemente za izradu mreže na površinama geometrije. Primjena ove metode dovodi do neuređene mreže (eng. *unstructured mesh*) gdje su elementi fleksibilni i mogu se koristiti za modeliranje složenih geometrija kao što su zakrivljene ili nepravilne površine.



Slika 4.7. Mreža u rotacijskoj domeni

Stacionarna domena nema toliku potrebu za ugušćavanjem mreže kao što je slučaj kod rotacijske domene i rubova geometrije turbine. Ali opet treba imat na umu i sam prijelaz iz stacionarne u rotacijsku domenu. U kompletnoj stacionarnoj domeni postavljena je veličina mreže za tijelo (eng. *Body Sizing*) na 0,041 m. Rezultati ugušćavanja mreže i primjena metode trokuta prikazana je na slici 4.7. Kao i u rotacijskoj domeni postavljena je metoda trokuta. Kako bi se osigurao gladak prijelaz između domena i dobilo maksimalno moguće preklapanje elemenata postavljena je veličina mreže na rubu od 0,017 m. Na slici 4.8 prikazana su područja svih korištenih metoda na numeričkoj mreži. Dobiveni izgled mreže u cijeloj domeni vidljiv je na slici 4.3.



Slika 4.8. Područja i primjenjene metode ugušćenja

Ovim metodama dobivena je mreža sa 92551 čvorova i 129727 elemenata, što je skoro dvostruko više od elemenata dobivenih u numeričkoj mreži prema članku [22]. Isto tako analizirane su metričke vrijednosti mreže (eng. *Mesh Metrics*). To su glavni pokazatelji kvalitete mreže koji predstavljaju procjenu performansi i točnosti numeričke mreže. Izobličenost (eng. *Skewness*) mjeri koliko element mreže odstupa od idealnog oblika. Računa se na različite načine no najbitnija je kutna izobličenost gdje se procjenjuje razlika između kutova u elementu i idealnih kutova. Ciljana izobličenost je postavljena na 0,7. Omjer stranica (eng. *Aspect Ratio*) je omjer najdužeg ruba prema najkraćem rubu u elementu. Visoki omjer stranica može dovesti do numeričkih pogrešaka i preporučeno je raspon ispod 5 ili 10 ovisno o rješavaču i prirodi simulacije. Ortogonalna kvaliteta (eng. *Orthogonal Quality*) mjeri koliko su kutovi između rubova i

odgovarajućih vektora blizu 90°. Raspon je između 0 i 1 gdje 1 predstavlja savršenu ortogonalnost. Kvaliteta elementa (eng. *Element Quality*) kombinira sve prethodno navedene čimbenike uz još mnoge kako bi dala ukupnu procjenu oblika elementa. Loša kvaliteta elementa može bitno utjecati na točnost i konvergenciju simulacije. Kvaliteta elementa se kreće između 0 i 1 gdje 1 predstavlja najbolju kvalitetu.

Tablica 4.1. Metričke vrijednosti mreže: a) dobivene, b) vrijednosti iz članka [22]

	Izobličenost		Omjer stranica		Ortogonalna kvaliteta	Kvaliteta elementa
	a)	b)	a)	b)	a)	a)
Minimalna	$1,66 \times 10^{-7}$		1,003		0,4085	0,21071
Maksimalna	0,86679	0,7	7,9735	2,9	1	1
Srednja vrijednost	0,10927	0,05	1,8066	1,18	0,95082	0,83355
Standardno odstupanje	0,11464	0,08	1,3269	4	0,058	0,2047

4.3. Priprema simulacije

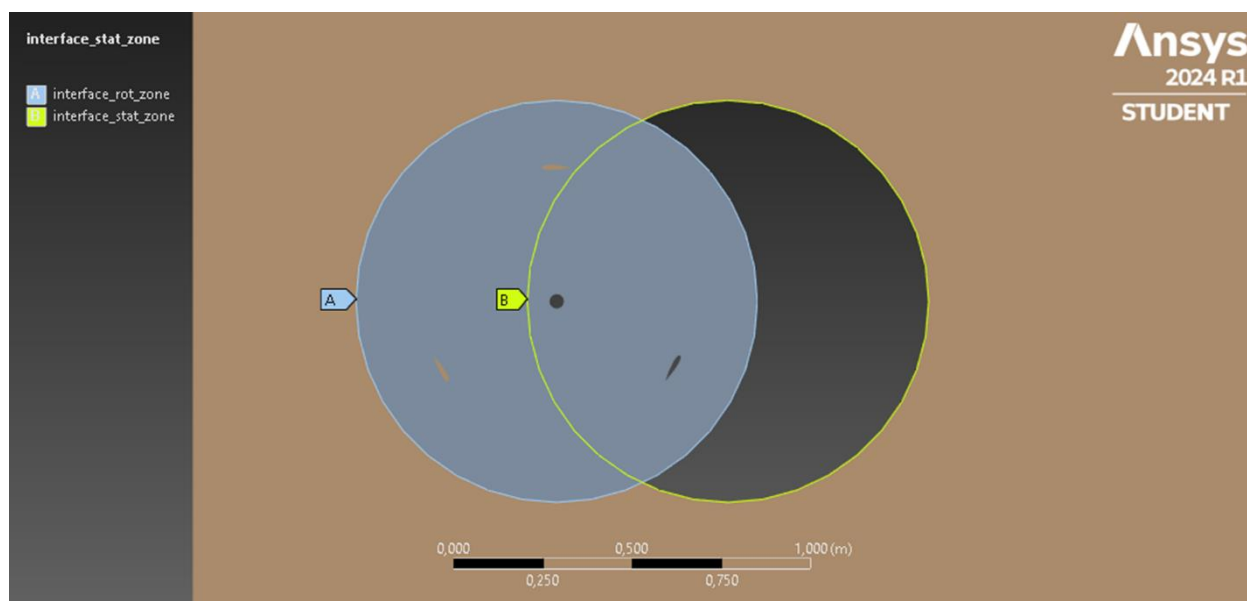
Nakon što je pripremljena numerička mreža, spremna je za ubacivanje u *Fluent*. Prvo se radi provjera mreže da se vidi da li je zadržana struktura koja je određena. U rješavaču se ostavlja zadani *Pressure-Based* tip i umjesto *Steady* odabire se *Transient*.

Za model turbulencije odabran je $k - \omega$ sa SST varijantom. U opcijama modela je odabrana i korekcija zakrivljenosti (eng. *Curvature Correction*) kako bi se izbjegla ograničenja standardnih modela turbulencije u točnom hvatanju zakrivljenosti strujanja i rotacije. Odabran je i *Production Limiter* kako bi se spriječile numeričke nestabilnosti i osiguralo da simulacija ostane u realnim granicama posebice u područjima gdje postoji rizik da model predvidi pretjeranu turbulenciju.

Kao fluid odabran je zrak za gustoćom od $1,225 \text{ kgm}^{-3}$ i viskozitetom od $1,7894 \times 10^{-5} \text{ kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$. Zatim se postavljaju rubni uvjeti kako bi se do kraja definirale postavke simulacije. Na rubnom uvjetu *inlet* postavljena je brzina sa vrijednošću od 6 ms^{-1} , intenzitet turbulencije (eng. *Turbulent Intensity*) na 1% i omjer turbulentne viskoznosti (eng. *Turbulent Viscosity Ratio*) na 10. Za rubni uvjet *outlet* izmjena tlaka u odnosu na atmosferski ostavljeni je na 0 Pa. Sve lopatice turbine kao i osovina rotora postavljene su na tip *wall* uz uvjet smicanja (eng. *Shear Condition*) kao *no-slip* što stvara viskozno trenje između fluida i stijenke te

pojavu graničnog sloja. Za potrebe nestacionarne analize uključena je i opcija *moving wall*. Vertikalni rubovi domene definirani su kao tip *wall* samo što smo je kod njih postavljena opcija *specified shear* s X i Y komponentom zadanom na 0 Pa. Taj rubni uvjet se postavlja zbog poznatog trenja između fluida i čvrstog sloja s poznatim trenjem.

Kako bi se dobilo relativno kretanje između rotacijske i stacionarne domene korištena je *Sliding Mesh* metoda. Ova tehnika jako dobro modelira fizičku stvarnost rotacijskih domena, ali kod implementacije može doći do problema ako nije napravljena odgovarajuća usklađenost između rotacijske i stacionarne zone. Također navedena metoda ima visoki zahtjev za računalnim resursima. Na rotacijskoj i stacionarnoj zoni zasebno su definirani rubni uvjeti koji će predstavljati sučelje, tj. mjesto prijenosa informacije iz jedne u drugu zonu. Slika 4.9 prikazuje definirane rubne uvjete u domeni koji predstavljaju mjesto dodira stacionarne i rotacijske zone.



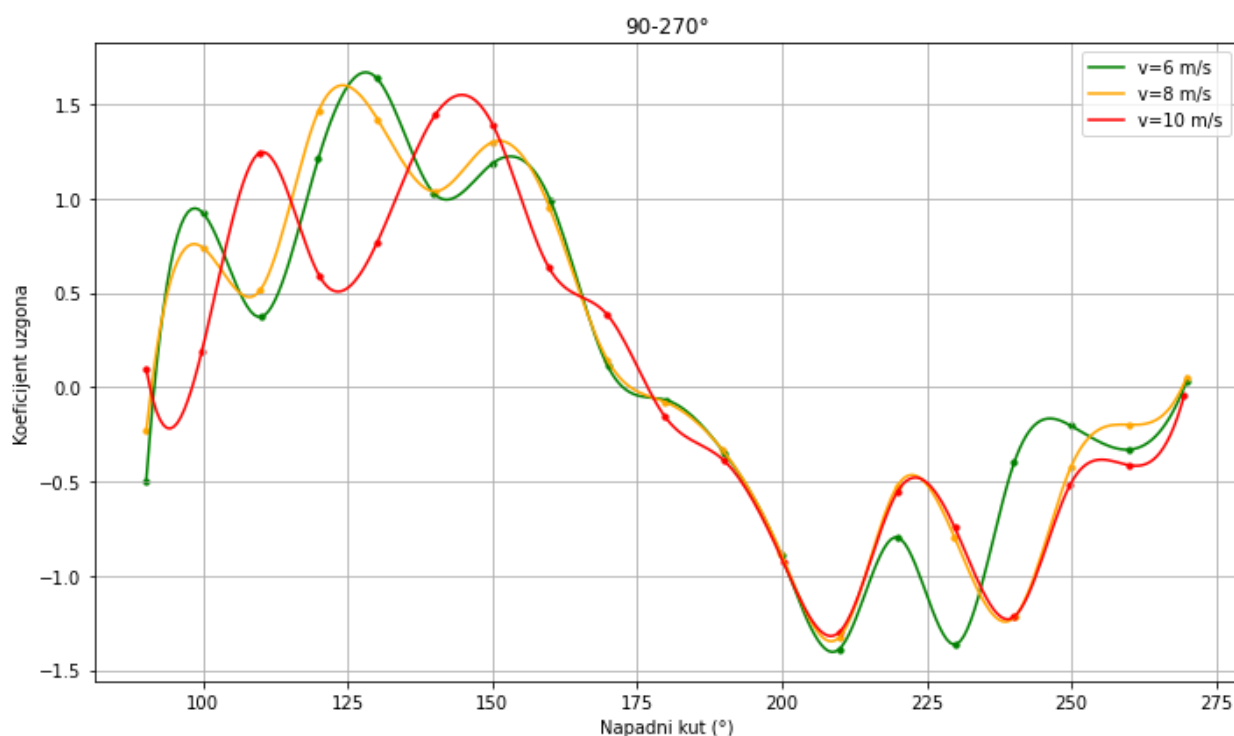
Slika 4.9. Prikaz sučelja korištenih za tehniku klizne mreže

Zatim je potrebno postaviti dinamičku mrežu. Uključene su postavke za *smoothing* i *remeshing*. *Smoothing* metoda prilagođava položaje čvorova bez promjene broja elemenata dok *remeshing* metoda generira potpuno novu mrežu kada postojeća mreža nije u stanju podnijeti velike deformacije s ciljem osiguravanja točnosti simulacije. Obje metode su ključne za točne i stabilne rezultate tijekom simulacije. Slijedi postavljanje 6DOF rješavača. Odabire se masa od 1 kg te *One DOF Rotation* sa zadanim momentom tromosti od $0,018 \text{ kgm}^{-2}$. Zatim je potrebno postaviti zone dinamičke mreže. Lopaticama i osovini pridodan je tip *Rigid Body* i uključena je postavka 6DOF rješavača. Za rotacijsku domenu radi se isto ali uključujena je i dodatna postavka

Passive. Pomoću 6DOF rješavača simulirano je fizičko kretanje turbine kao rezultat djelovanja sila fluida. Pasivna funkcija rotacijske domene omogućava fiksnu brzinu rotacije bez povratnog odgovora na dinamičke sile fluida. Za stacionarnu zonu postavljamo tip *Stationary*. Postavljeni su monitori za praćenje uzgona, otpora i kutne brzine. Isto tako bilo je potrebno postaviti *surface point* zajedno sa novim koordinatnim sustavom koji će omogućiti praćenje položaja kroz vrijeme dok turbina ubrzava. Kao metodu rješavanja odabire se *Coupled* shema kako bi se osigurala brža konvergencija rješenja. Postavljene su i druge derivacije rješenja (eng. *Second Order Upwind*) za količinu gibanja, turbulentnu kinetičku energiju i specifičnu brzinu disipacije kako bi se dobila preciznija rješenja. Reziduali kao osnovni uvjeti konvergencije rješenja postavljeni su na 10^{-4} . Dodaju se kriteriji uzgona i otpora kao dodatni uvjeti za potrebe konvergencije rješenja sa istim vrijednostima. Svi uvjeti moraju biti zadovoljeni kako bi rješenje konvergiralo. Nakon toga inicijalizirano je rješenje na *inlet*-u kako bi mogli pokrenuti simulaciju. Kako je na početku postavljen nestacionaran tip simulacije rješenja neće konvergirati po iteracijama već po vremenskim koracima. Postavljeni je broj vremenskih koraka (eng. *Number of Time Steps*) koji određuju ukupnu količinu koraka koji će simulacija proći, veličina vremenskog koraka (eng. *Time Step Size*) koja postavlja duljinu svakog koraka gdje će manji koraci povećati točnost simulacije posebice u slučajevima naglih promjena. Smanjivanje veličine koraka povećava broj potrebnih iteracija i ukupno vrijeme simulacije. I na kraju postavljen je maksimalan broj iteracija po vremenskom koraku (eng. *Max Iterations per Time Step*). Pomoću ove opcije ograničava se maksimalan broj iteracija unutar svakog vremenskog koraka kako bi se postigla konvergencija rješenja. Kod nestacionarne analize potrebno je osigurati konvergenciju rješenja unutar svakog vremenskog koraka kako bi se osigurala pouzdanost i stabilnost točnih rezultata. U slučaju da rješenje ne konvergira u vremenskom koraku moguće je prenošenje greške u naredne korake gdje se greška propagira kroz cijelu simulaciju. Postavljeni broj vremenskih koraka je 3000, veličina vremenskog koraka na 10^{-3} s i maksimalan broj iteracija po vremenskom koraku na 30 kako bi rješenje imalo dovoljno prostora da konvergira.

5. REZULTATI SIMULACIJE

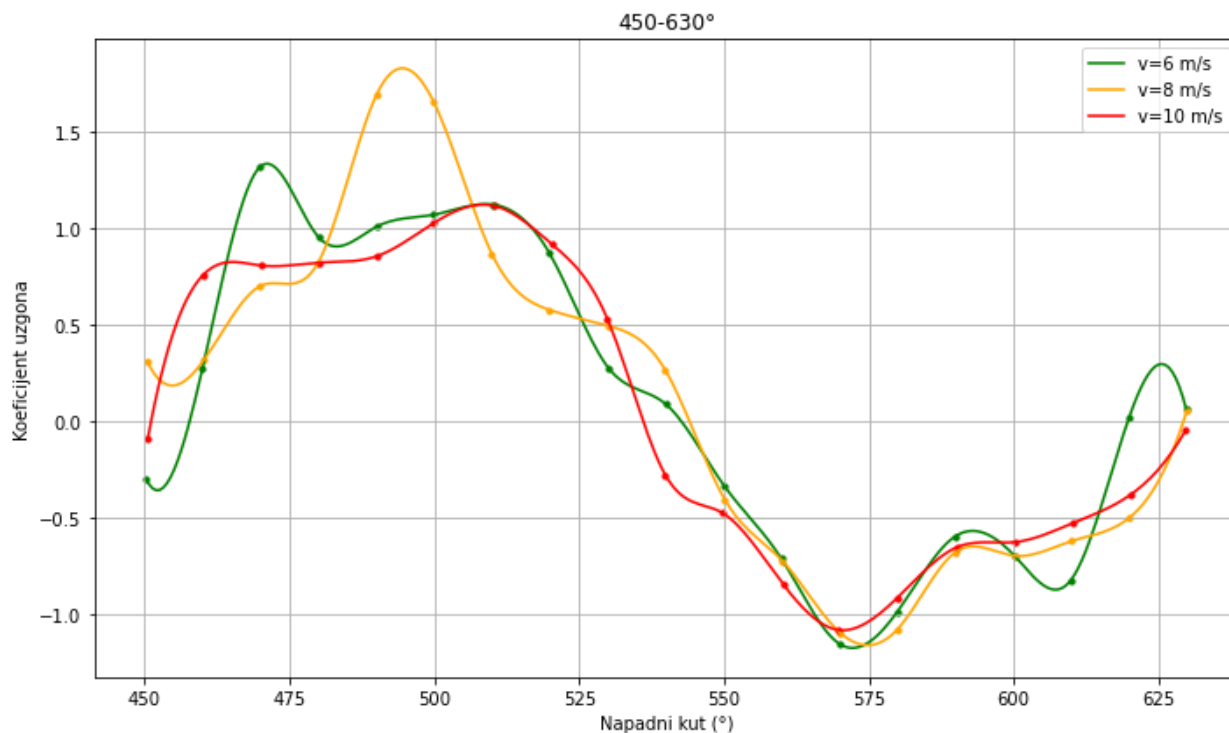
Prethodno navedene postavke numeričke mreže i rješavača postavljene su s ciljem rekreiranja rješenja iz znanstvenog članka. Prema članku analiza je provedena do postizanja optimalne kutne brzine turbine od 68 rads^{-1} . Zbog zahtjeva nestacionarne analize na računalne resurse simulacija je provedena iz stanja mirovanja u trajanju od 3 s. Rješenja simulacije dat će uvid u mogućnosti Darrieusove vjetroturbine za samopokretanjem. Rješenja su inicijalizirana na rubnom uvjetu *inlet* za brzine od 2 ms^{-1} , 6 ms^{-1} , 8 ms^{-1} i 10 ms^{-1} kroz ukupno vrijeme od 3 s. Nakon pokretanja simulacije praćena je konvergencija rješenja. Za prethodno navedene kriterije reziduala, koeficijenta uzgona i otpora prati se konvergencija rješenja nakon pokretanja simulacije. Dobivena je konvergencija rješenja unutar svakog vremenskog koraka što je bio prvi pokazatelj dobro postavljenih parametara simulacije.



Graf 5.1. Koeficijent uzgona tijekom rotacije pri napadnom kutu 90° - 270°

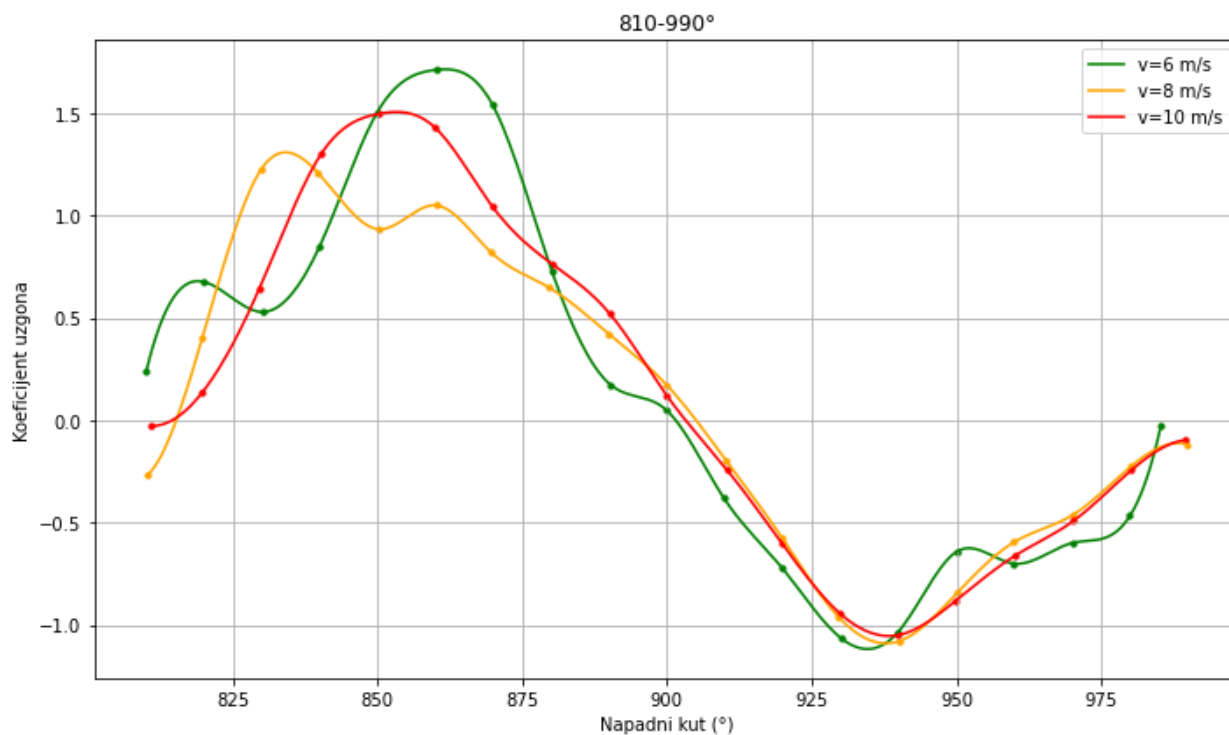
Rješenja u grafu 5.1 prikazuju odnos vrijednosti koeficijenta uzgona u odnosu na napadni kut za raspon od 90° – 270° . Pri brzini od 6 m/s postiže se pozitivan uzgon između napadnih kutova od 130° – 170° , ali nakon toga vrijednosti padaju ispod nule. Ova relativno kratka faza pozitivnog uzgona sugerira da bi turbina mogla imati poteškoća u održavanju rotacije. Pri

brzinama od 8 m/s i 10 m/s razdoblja pozitivnog uzgona su dulja i s većom amplitudom. Pri brzini od 10 m/s uzgon ostaje pozitivan u intervalu od $90^\circ - 180^\circ$ što ukazuje na bolju sposobnost samopokretanja pri višim brzinama.



Graf 5.2. Koeficijent uzgona tijekom rotacije pri napadnom kutu $450^\circ - 630^\circ$

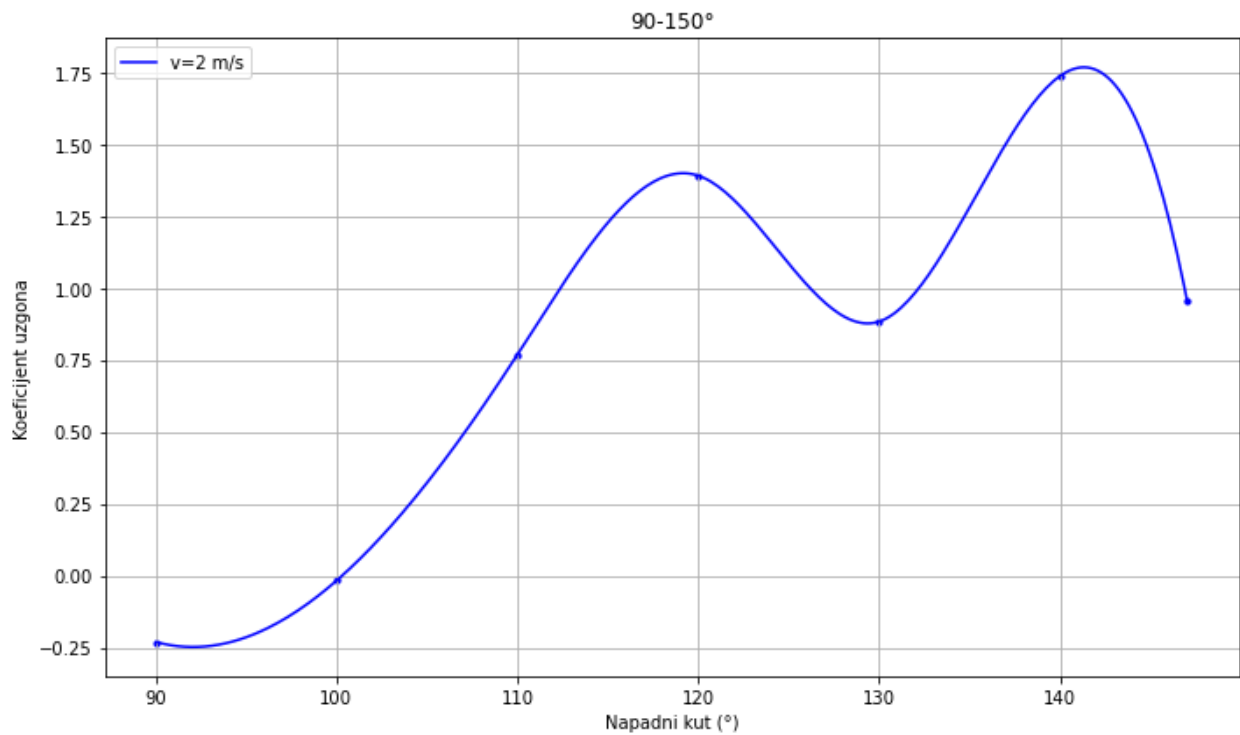
Vrijednosti prikazane grafom 5.2 pokazuju izraženije oscilacije u koeficijentu uzgona za niže brzine vjetrova. Za brzinu od 6 m/s koeficijent uzgona varira s kratkim pozitivnim razdobljima pri napadnim kutovima od $475^\circ - 525^\circ$. Pri brzinama od 8 m/s i 10 m/s koeficijent uzgona pokazuje veći pozitivan uzgon pri napadnim kutovima od $475^\circ - 525^\circ$. U drugom ciklusu rotacije turbina pokazuje veću sposobnost za samopokretanjem pri većim brzinama vjetrova. Pokazuje i manje ekstremne oscilacije u koeficijentu uzgona pri većim brzinama vjetrova.



Graf 5.3. Koefficijent uzgona tijekom rotacije pri napadnom kutu 810°-990°

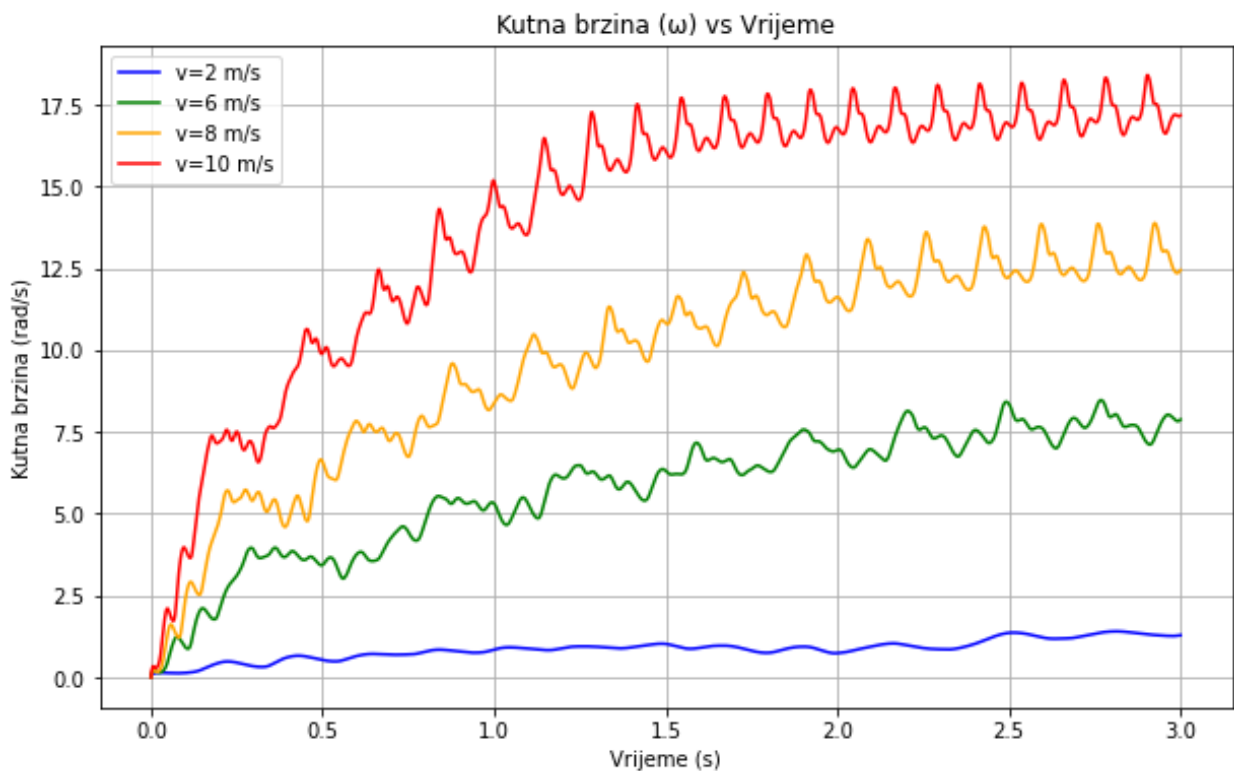
Rješenja iz grafa 5.3 prikazuju koeficijente uzgona pri kutovima napada od 810° – 990°. Za brzinu od 6 m/s uočava se kratko pozitivno razdoblje između 850° – 900° gdje nakon toga uzgon pada u negativne vrijednosti. Pri brzinama od 8 m/s i 10 m/s prisutne su faze duljeg pozitivnog uzgona što ukazuje na bolje mogućnosti samopokretanja.

Prikazana su rješenja u istim intervalima za prva tri ciklusa rotacije turbine. Veće brzine jasno prikazuju mogućnost samopokretanja, dok bi za brzinu od 6 m/s trebalo pratiti vrijednosti u narednim ciklusima rotacije pošto rješenja indiciraju na ograničene mogućnosti.



Graf 5.4. Koefficient uzgona tijekom rotacije pri napadnom kutu 90°-150°

Napravljena je dodatna analiza strujanja za brzinu od 2 m/s prikazana grafom 5.4. Kroz cijelu simulaciju dobivene su vrijednosti napadnog kuta do 150°, što pokazuje da pri nižim brzinama vjetra turbina ne stvara dovoljno uzgona kako bi savladala inerciju.



Graf 5.5. Postignuta kutna brzina turbine za vrijeme trajanja simulacije

Graf 5.5 prikazuje kako različite brzine vjetra utječu na brzinu rotacije turbine tijekom trajanja simulacije od 3 s. Za brzinu od 2 ms^{-1} imamo nisku i stabilnu kutnu brzinu tijekom cijele simulacije koja ne prelazi 2 rads^{-1} . Ova niska kutna brzina jasno pokazuje da uzgon na lopaticama nije dovoljno jak da nadvlada trenje i inerciju turbine, što potvrđuje da brzina od 2 ms^{-1} nije adekvatna za pokretanje turbine. Brzina od 6 ms^{-1} pokazuje puno veći rast kutne brzine dostižući vrijednosti iznad $7,5 \text{ rads}^{-1}$. Rast kutne brzine je kontinuiran s izraženim fluktuacijama. Te fluktuacije su povezane s promjenama uzgona tijekom rotacije što je normalno za Darrieusove turbine koje doživljavaju varijabilni uzgon kroz ciklus rotacije. Iako su prisutne oscilacije, rješenja iz grafa 5.5 nam potvrđuju da je brzina od 6 m/s dovoljna za samopokretanjem dok podaci o koeficijentu uzgona nisu mogli dati jasnu sliku. Brzina vjetra od 8 ms^{-1} ubrzava turbinu do kutne brzine od 12 rads^{-1} sa oscilacijama manjeg intenziteta u odnosu na niže brzine vjetra. Smanjene oscilacije ukazuju na stabilniji i jači uzgon tijekom cijelog ciklusa rotacije. Najveća brzina vjetra pokazuje najviše vrijednosti kutne brzine koje dosežu 18 rads^{-1} . Oscilacije su prisutne, ali su proporcionalno manje u odnosu na ukupnu brzinu rotacije, što ukazuje na to da turbina pri toj brzini vjetra postiže vrlo stabilnu rotaciju uz dovoljan uzgon u svim fazama ciklusa. Pri većim brzinama vjetra turbine ne samo da se lakše pokreću, već i lakše održavaju rotaciju bez značajnih gubitaka energije kod varijacija uzgona.

Analiza uzgona i kutne brzine tijekom nestacionarne simulacije jasno pokazuje reakciju turbine za različite brzine vjetra. Pri manjim brzinama vjetra, oscilacije uzgona i niska kutna brzina ukazuju na nemogućnost stabilne rotacije, što onemogućava samopokretanje. Pri višim brzinama oscilacije su i dalje prisutne, ali pozitivan uzgon je dovoljan za postizanje stabilne i kontinuirane rotacije. Brzine od 6 ms^{-1} , 8 ms^{-1} i 10 ms^{-1} prikazuju optimalne uvjete za samopokretanje, dok brzina od 2 ms^{-1} ne održava dovoljno stabilnu rotaciju. Ovi rezultati simulacije potvrđuju već praktično dokazane nemogućnosti Darrieusove vjetroturbine za samopokretanjem pri brzinama vjetra manjim od 4 ms^{-1} .

6. ZAKLJUČAK

U ovom završnom radu provedena je 2D nestacionarna analiza strujanja kroz Darrieusovu turbinu za različite brzine vjetra na ulazu u simulirani zračni tunel. Rezultati strujanja pokazuju utjecaj djelovanja uzgona na mogućnost samopokretanja iz stanja mirovanja. Ovom analizom dobili smo osnovni uvid u ponašanje turbine za različite brzine nastrojavanja. Kao dodatni korak potrebno je provesti validaciju provedenih simulacija.

Osim usporedbe rezultata trebalo bi provesti i numeričku analizu mreže (eng. *mesh independence study*) gdje bi se provela analiza na nekoliko verzija modela s različitim gustoćama mreže, pratiti iste parametre i na kraju odabrati onu mrežu koja daje točne rezultate uz razumnu potrošnju resursa. Iako je primijenjena ista metodologija izrade numeričke mreže kao u znanstvenom članku, metričke vrijednosti mreže se ne podudaraju, što upućuje na mogućnost da su korištene dodatne metode koje nisu eksplicitno navedene u članku.

Uz analizu mreže poželjno bi bilo pustiti simulaciju u više vremenskih koraka kako bi turbina postigla rad u optimalnim uvjetima i u tom trenutku izvaditi rješenja. Smanjiti i veličinu samog koraka kako bi se još detaljnije uhvatilo strujanje u kritičnim područjima. U sljedećem koraku smanjiti kriterij konvergencije s 10^{-4} na 10^{-5} ili čak 10^{-6} i na taj način povećati preciznost rješenja.

7. LITERATURA

- [1] S Interneta, <https://earth.org/fossil-fuel-accounted-for-82-of-global-energy-mix-in-2023-amid-record-consumption-report/> Srpanj, 2024
- [2] S Interneta, IEA (2023), Global Energy and Climate Model, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/global-energy-and-climate-model>, Licence: CC BY 4.0, Listopad, 2023
- [3] S Interneta, <https://iro.nl/news-and-press/award-decision-windfarm-hollandse-kust-zuid-to-be-announced-on-march-19-the-1st-dutch-tender-without-subsidy-way-ahead-of-expectations/>, Ožujak, 2018
- [4] S Interneta, Vjetroturbine. (2022, rujna 21). 'Wikipedija, Slobodna enciklopedija. [//hr.wikipedia.org/w/index.php?title=Vjetroturbine&oldid=6469827](https://hr.wikipedia.org/w/index.php?title=Vjetroturbine&oldid=6469827).
- [5] S Interneta, <https://windmillstech.com/wind-turbine-components/>, Vertical Axis Wind Turbines - Windmills Tech, 2024
- [6] S Interneta, <https://www.eia.gov/energyexplained/wind/types-of-wind-turbines.php>, Prosinac, 2023
- [7] Arredondo-Galeana, A.; Brennan, F. Floating Offshore Vertical Axis Wind Turbines: Opportunities, Challenges and Way Forward. *Energies* 2021, 14, 8000. <https://doi.org/10.3390/en14238000>
- [8] Zhang, H.; Li, Z.; Xin, D.; Zhan, J. Improvement of Aerodynamic Performance of Savonius Wind Rotor Using Straight-Arc Curtain. *Appl. Sci.* 2020, 10, 7216. <https://doi.org/10.3390/app10207216>
- [9] S Interneta, Savonius wind turbine, <https://w.wiki/B7RQ>, 8 June 2024
- [10] Turbulent Flow Characteristics and Dynamics Response of a Vertical-Axis Spiral Rotor - Scientific Figure on ResearchGate. Available from: https://www.researchgate.net/figure/Tested-vertical-axis-spiral-rotor_fig6_274431326, 2023
- [11] S Interneta, <https://wind-works.org/photo-gallery/vawt-photos/flowind-photos/flowind-17-m-19-m-darrieus-vawt-photos/>, 2023
- [12] McConnell, Robert D. "Giromill overview." Wind Energy Innovative Systems Conference Proceedings: May 23-25, 1979, The Four Seasons Motor Inn, Colorado Springs, Colorado. Vol. 49. No. 184. AWEA, 1979.
- [13] S Interneta, <https://www.electricalibrary.com/en/2019/03/12/darrieus-turbine/>

- [14] Adams, Zachary, and Jun Chen. "Optimization and validation of cycloturbine blade-pitching kinematics via flux-line theory." *AIAA Journal* 56.5 (2018): 1894-1909.
- [15] S Interneta, <https://www.quietrevolution.com/products/>, Travanj, 2024
- [16] S Interneta, <https://www.ansys.com/simulation-topics/what-is-computational-fluid-dynamics>, 2024
- [17] S Interneta, Wikipedia contributors. (2024, July 28). Laminar flow. In *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Laminar_flow&oldid=1237199341
- [18] Kranjčević, L.: "Mehanika fluida", Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, Skripta za studente Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci Rijeka 2020
- [19] Kranjčević, L.: "Mehanika fluida", Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, Rijeka 2008
- [20] S Interneta, https://www.cfd-online.com/Wiki/K-epsilon_models, Lipanj, 2011
- [21] Kranjčević, Lado, Zoran Čarija, and Sanjin Fućak. "Numerical mesh impact on computational simulation efficiency." *Engineering Review: Međunarodni časopis namijenjen publiciranju originalnih istraživanja s aspekta analize konstrukcija, materijala i novih tehnologija u području strojarstva, brodogradnje, temeljnih tehničkih znanosti, elektrotehnike, računarstva i građevinarstva* 27.2 (2007): 25-36.
- [22] Asr, Mahdi Torabi, et al. "Study on start-up characteristics of H-Darrieus vertical axis wind turbines comprising NACA 4-digit series blade airfoils." *Energy* 112 (2016): 528-537.
- [23] S Interneta, <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca0018-il>, 2024

8. POPIS SLIKA

<i>Slika 2.1 Prikaz vjetroelektrane na otvorenom moru [3]</i>	3
<i>Slika 2.2. Osnovni dijelovi vjetroturbine [5]</i>	5
<i>Slika 2.3. Vjetroturbina s vodoravnom osi [6]</i>	7
<i>Slika 2.4. Tipovi VAWT: a) Savonious rotor, b) Darrieus rotor, c) Giromill, d) Helical rotor [5]</i> ..	8
<i>Slika 2.5. Razmještaj vjetroelektrana za (a) (HAWT) i (b) (VAWT), kako bi se smanjio međusobni utjecaj vjetroturbina pretpostavljajući jednoliki smjer vjetra [7]</i>	9
<i>Slika 2.6. Aerodinamika vjetroturbina s vertikalnom osi [5]</i>	9
<i>Slika 2.7. Spiralni Savonius rotor [10]</i>	10
<i>Slika 2.8. Darrieus "eggbeater" vjetroelektrana u prijevojima Altamont i Tehachapi u Kaliforniji [11]</i>	11
<i>Slika 2.9. Giromill / H-rotor [13]</i>	12
<i>Slika 2.10. Usporedba shema VAWT s fiksnim nagibom i cikloturbinom (varijabilni nagib) [14]</i>	12
<i>Slika 2.11. Spiralni rotor "Qr6" [15]</i>	13
<i>Slika 3.1. Idealan, laminaran i turbulentan oblik profila brzine [18]</i>	16
<i>Slika 3.2. Neki tipovi dvodimenzijske numeričke mreže: a.) regularna ortogonalna; b.) neregularna strukturirana; c.) nestrukturirana [21]</i>	20
<i>Slika 4.1. Izgled NACA0018 aeroprofila [23]</i>	22
<i>Slika 4.2. Geometrijski opis računalne domene [22]</i>	23
<i>Slika 4.3. Prikaz rubnih uvjeta računalne domene kao i granica stacionarne i rotacijske domene</i>	24
<i>Slika 4.4. Prikaz imenovanih selekcija unutar rotacijske zone</i>	24
<i>Slika 4.5. Generirana mreža na temelju koje je napravljena analiza strujanja</i>	25
<i>Slika 4.6. Izgled mreže oko lopatice nakon postavljanja veličine mreže na rubu i inflacije</i>	26
<i>Slika 4.7. Mreža u rotacijskoj domeni</i>	26
<i>Slika 4.8. Područja i primjenjene metode ugušćenja</i>	27
<i>Slika 4.9. Prikaz sučelja korištenih za tehniku klizne mreže</i>	29

9. POPIS GRAFOVA

<i>Graf 5.1. Koeficijent uzgona tijekom rotacije pri napadnom kutu 90°-270°</i>	<i>31</i>
<i>Graf 5.2. Koeficijent uzgona tijekom rotacije pri napadnom kutu 450°-630°</i>	<i>32</i>
<i>Graf 5.3. Koeficijent uzgona tijekom rotacije pri napadnom kutu 810°-990°</i>	<i>33</i>
<i>Graf 5.4. Koeficijent uzgona tijekom rotacije pri napadnom kutu 90°-150°</i>	<i>34</i>
<i>Graf 5.5. Postignuta kutna brzina turbine za vrijeme trajanja simulacije</i>	<i>35</i>

10.POPIS TABLICA

<i>Tablica 4.1. Podaci o geometriji za analiziranu vjetroturbinu [22]</i>	<i>23</i>
<i>Tablica 4.2. Metričke vrijednosti mreže: a) dobivene, b) vrijednosti iz članka [22]</i>	<i>28</i>

11. SAŽETAK

Napravljena je 2D nestacionarna analiza strujanja za više brzina vjetra na ulazu kroz Darrieusovu vjetroturbinu NACA0018 aeroprofilama. Praćeni su koeficijenti uzgona te kutne brzine. Dobivene vrijednosti za različite brzine strujanja dovedene su u korelaciju te su promatrane u kontekstu mogućnosti samopokretanja turbine.

Ključne riječi: Darrieusova vjetroturbina, VAWT, računalna dinamika fluida, nestacionarno strujanje, 6DOF

SUMMARY

A 2D transient flow analysis was conducted for multiple wind inlet speeds through a Darrieus wind turbine with NACA0018 airfoils. The lift coefficients and angular velocities were monitored. The obtained values for different flow speeds were correlated and observed in the context of the turbine's self-starting capability.

Keywords: Darrieus wind turbine, VAWT, computational fluid dynamics, unsteady flow, 6DOF