

# Analiza utjecaja oblika lopatice na strujanje fluida kroz Darrieus vjetroturbinu s vertikalnom osi

---

Matić, Filip

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

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:190:763768>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-03**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**ANALIZA UTJECAJA OBLIKA LOPATICE NA STRUJANJE  
FLUDA KROZ DARRIEUS VJETROTURBINU S  
VERTIKALNOM OSI**

Rijeka, srpanj 2022.

Filip Matić

0069078552

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**ANALIZA UTJECAJA OBLIKA LOPATICE NA STRUJANJE  
FLUDA KROZ DARRIEUS VJETROTURBINU S  
VERTIKALNOM OSI**

Mentor: Prof. dr. sc. Zoran Čarija

Rijeka, srpanj 2022.

Filip Matić

0069078552

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

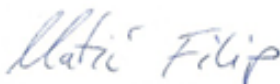
Pristupnik: **Filip Matić (0069078552)**  
Studij: **Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva**

Zadatak: **Analiza utjecaja oblika lopatice na strujanje fluida kroz Darrieus vjetroturbinu s vertikalnom osi / Influence of blade shape of Darrieus vertical axis wind turbine on fluid flow**

### Opis zadatka:

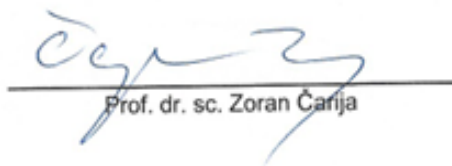
Upotrebom dostupnih CAD alata potrebno je definirati 2D geometriju vjetroturbine s vertikalnom osi. Lopatice turbine definirati NACA profilom. Za tako definiran model vjetroturbine potrebno je generirati numeričku mrežu, pripremiti simulaciju i provesti numeričku analizu. Rad turbine potrebno je analizirati za različite geometrijske karakteristike lopatica. 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 koristeći znanje stečeno studiranjem na Tehničkom fakultetu u Rijeci uz pomoć mentora te navedene literature.

Filip Matić

## **ZAHVALA**

Zahvaljujem se mentoru prof.dr.sc. Zoranu Čariji na pruženoj prilici prilikom odabira kolegija u sklopu pisanja završnoga rada, a posebno hvala asistentici dr.sc. Ivani Lučin na pomoći oko izrade simulacija te pruženim informacijama potrebnima za pisanje samoga rada. Ovom prilikom zahvaljujem se i svojim roditeljima na pruženoj podršci tijekom cijelog studija.

# SADRŽAJ

|  |    |
|--|----|
| 1. UVOD.....   | 1  |
| 2. ENERGIJA VJETRA .....                                       | 2  |
| 3.1. Glavni dijelovi vjetroturbine.....                        | 5  |
| 3.2. Načelo rada vjetroturbine .....                           | 8  |
| 3.3. Koeficijent snage.....                                    | 8  |
| 3.4. Vrste vjetroturbina.....                                  | 10 |
| 3.4.1. Vjetroturbine s vodoravnom osi .....                    | 10 |
| 3.4.2. Vjetroturbine s okomitom osi.....                       | 11 |
| 3.5. Savoniusova vjetroturbina .....                           | 12 |
| 3.6. Darrieusova vjetroturbina .....                           | 13 |
| 3.6.1. Darrieusova vjetroturbina s ravnim lopaticama .....     | 14 |
| 3.6.2. Darrieusova vjetroturbina sa spiralnim lopaticama ..... | 14 |
| 3.6.3. Darrieusova vjetroturbina s J-lopaticama .....          | 15 |
| 3.6.4. Hibridna Savonius-Darrieus vjetroturbina .....          | 16 |
| 4. RAČUNALNA DINAMIKA FLUIDA .....                             | 18 |
| 4.1. Teoretska osnova.....                                     | 20 |
| 4.2. Turbulencija .....  | 21 |
| 4.3. Numeričke mreže .....                                     | 23 |
| 5. PROBLEMATIKA.....   | 24 |
| 5.1. Geometrijske značajke .....                               | 25 |
| 5.2. Izrada numeričke mreže .....                              | 27 |
| 5.3. Postavke u Fluentu i definiranje rubnih uvjeta .....      | 27 |
| 6. REZULTATI.....  | 32 |
| 7. ZAKLJUČAK.....  | 36 |
| 8. LITERATURA.....   | 37 |

|                        |    |
|------------------------|----|
| 9. POPIS SLIKA.....    | 38 |
| 10. POPIS TABLICA..... | 39 |
| 11. SAŽETAK.....       | 40 |



## 1. UVOD

Najvažniji izvori energije u svijetu su fosilna goriva. Međutim, njihovim izgaranjem oslobađaju se otrovni i štetni plinovi koji zagađuju okoliš. Fosilna goriva neobnovljivi su izvori i rezervi se daleko više troše nego što se stvaraju nove. Zbog tih razloga u 21.stoljeću u cijelom svijetu raste interes i ulaganja u obnovljive izvore energije.

Najveći udio obnovljive energije dolazi iz hidroenergije, ali se posljednjih godina sve više razvija i koristi energija vjetra. Zbog početne ekonomske neisplativosti te osciliranja brzine puhanja vjetra, instalacija vjetroelektrana bila je privilegija koju su si nekad mogle priuštiti samo bogate zemlje. No zbog tehnološkog razvoja i sve manje razlike u cijeni izgradnje vjetroelektrana i hidroelektrana, sve se više zemalja okreće energiji vjetrom.

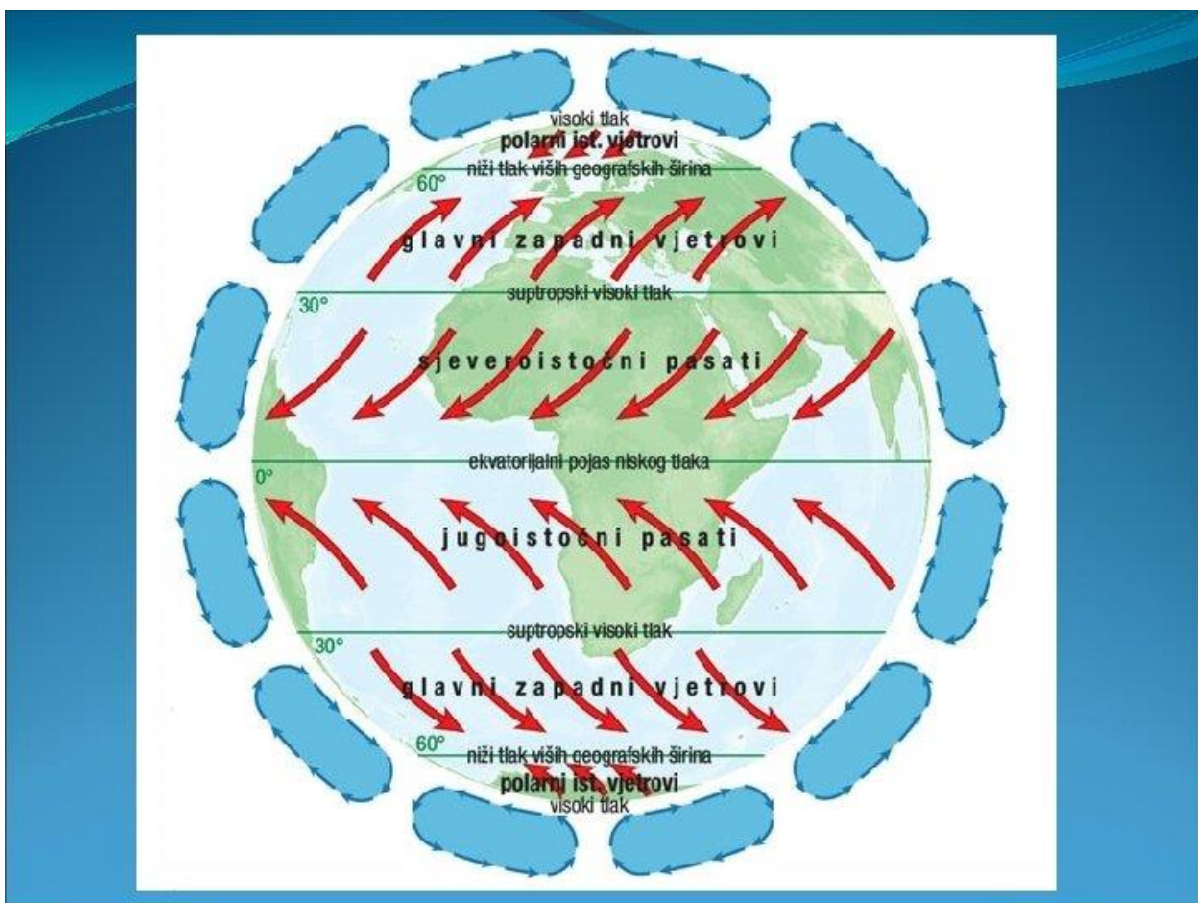
Vjetroturbine vrlo su važne za budućnost, a energija vjetra, uz hidroenergiju i solarnu energiju, mogla bi biti rješenje kada se u potpunosti iscrpe zalihe fosilnih goriva. U današnje vrijeme većinom se koriste vjetroturbine s horizontalnom osi. Razlog leži u tome što su vodeće zemlje u razvoju vjetroturbina Njemačka i Danska. Njihovom reljefu te prosječnoj brzini vjetra više odgovaraju vjetroturbine s horizontalnom osi. No u posljednje vrijeme sve su zanimljivije vjetroturbine s vertikalnom osi. Novim istraživanjima dokazano je da vjetroturbine s vertikalnom osi zbog svoje veličine, jednostavnijeg održavanja te radom u širem području s obzirom na brzinu vjetra mogu proizvoditi jeftiniju električnu energiju u usporedbi s vjetroturbinama s horizontalnom osi.

Tematika ovog rada izvedba je Darrieusove vjetroturbine s vertikalnom osi. Objasnjeno je nastajanje vjetra te kako iskoristiti energiju vjetra. Objasnjeni su dijelovi i princip rada vjetroturbina, uspoređene su različite izvedbe te je detaljnije opisana Darrieusova vjetroturbina. Definirane su geometrije i numeričke mreže te su prikazane postavke korištene u simulacijama. Simulacije su provedene u programu *Ansys Fluent*. Uspoređivan je koeficijent uzgona za tri različita aeroprofila te su pojašnjeni rezultati simulacija.

## 2. ENERGIJA VJETRA

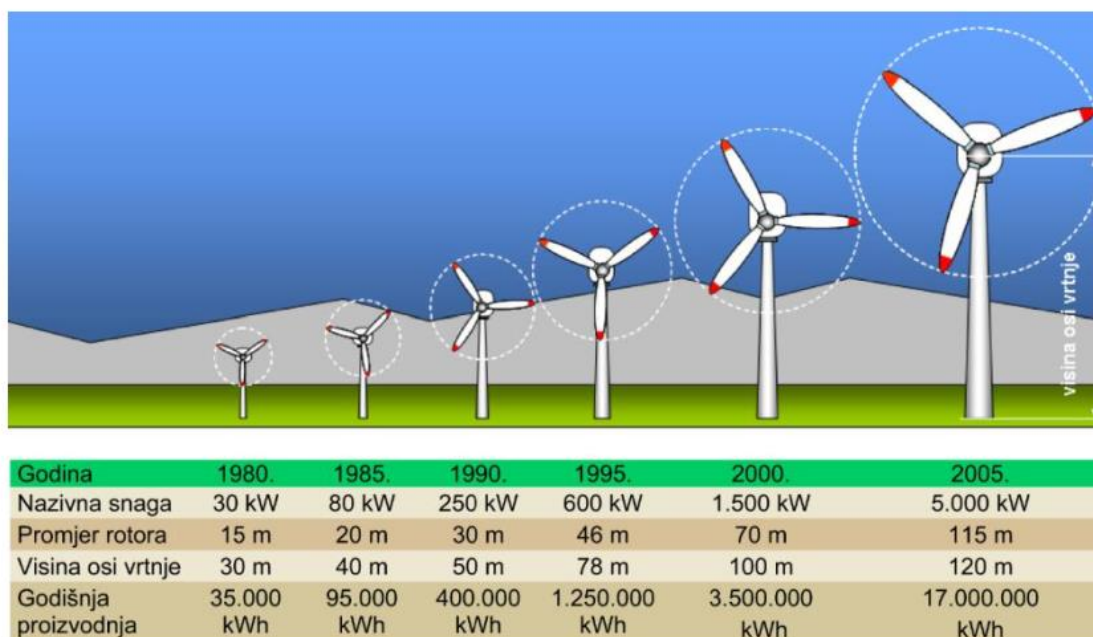
Vjetar se definira kao paralelno gibanje atmosferskog zraka u odnosu na Zemljinu površinu uzrokovano razlikama u gustoći zraka. Kretanje vjetra događa se prirodno od područja veće gustoće prema područjima manje gustoće i nastavlja se sve dok se gustoće ne uravnoteže.[1]

Glavni uzrok razlika u gustoći zraka neravnomjerno je zagrijavanje Zemljine površine sunčevim zračenjem. Ekvatorijalno područje prima više sunčevog zračenja od područja na višim geografskim širinama jer se upadni kut sunčevih zraka smanjuje s povećanjem geografske širine zbog zakrivljenosti Zemlje. Zbog toga se zagrijani zrak u području visokog tlaka diže u atmosferu i putuje prema Zemljinim polovima, a taj zrak biva zamijenjen zrakom koji se okreće od polova prema ekvatoru. Važno je spomenuti da brzina i smjer vjetra ovise o rezultanti svih sila koje djeluju na zrak (Coriolisova sila, centrifugalna sila, sila gradijenta tlaka zraka, trenje itd.).



Slika 2.1. Smjer globalnog vjetra[2]

Iskorištavanje energije vjetra seže daleko u prošlost – vjetrenjače su bile korištene za mljevenje žitarica, navodnjavanje tla, piljenje drva itd. No krajem 18. i početkom 19.stoljeća, razvojem parnih strojeva i motora s unutarnjim izgaranjem, vjetrenjače gube svoj značaj, odnosno električna energija i elektrifikacija istiskuju ih iz primjene. Prvi vjetroagregat za proizvodnju električne energije konstruiran je krajem 19. stoljeća i od tada se energija vjetra koristi isključivo za proizvodnju električne energije. U posljednjih 50-ak godina, performanse i dimenzioniranje vjetroturbina značajno su se razvile.

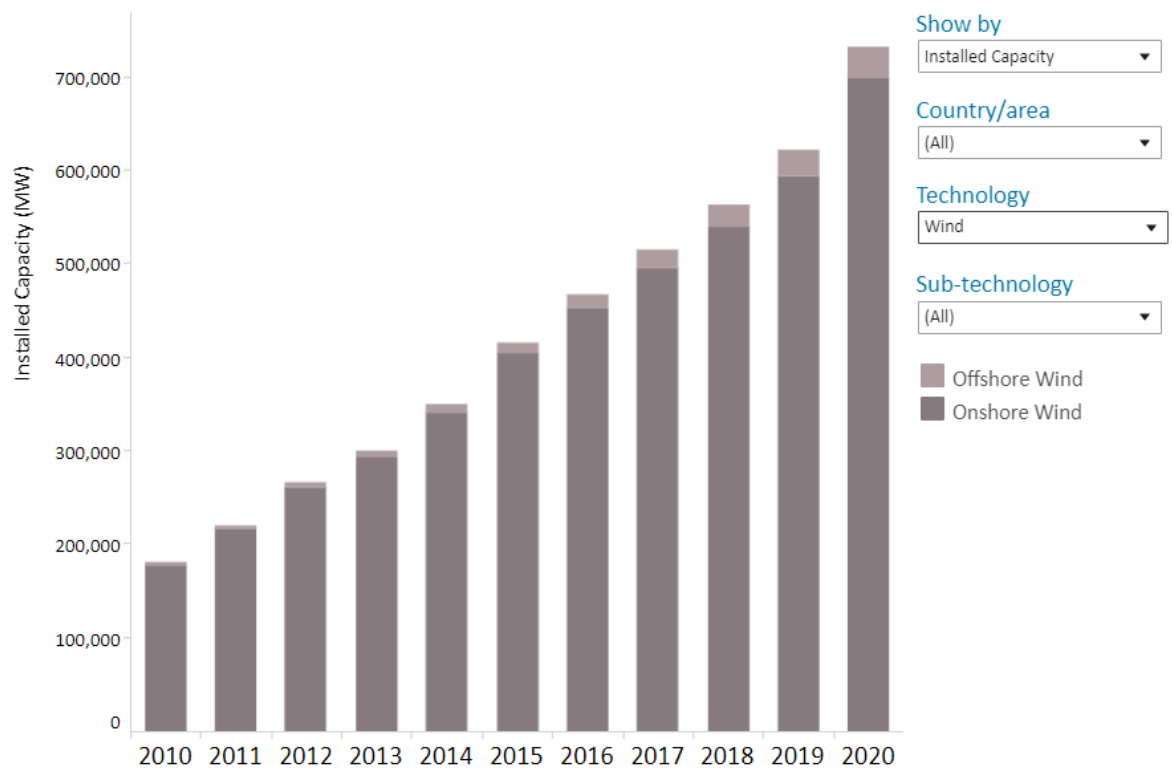


Slika 2.2. Razvoj snage i dimenzija vjetroagregata [1]

Energija vjetra jedna je od najbrže rastućih tehnologija obnovljivih izvora energije. Upotreba je u porastu u cijelom svijetu, dijelom zbog smanjenih troškova. Proizvodnja električne energije vjetra udvostručila se u periodu između 2009. i 2013.godine, a 2016. godine energija vjetra činila je 6% električne energije proizvedene iz obnovljivih izvora prema podacima IRENA-e. [3] Energija vjetra nudi ogroman potencijal i taj će postotak rasti u budućnosti. Do kraja 2020. godine u svijetu su bile instalirane vjetroelektrane ukupne snage 732 GW.

### Installed Capacity Trends

Navigate through the filters to explore trends in renewable energy



©IRENA Visit [www.irena.org/Statistics](http://www.irena.org/Statistics) for more information

Slika 2.3. Prikaz porasta ukupne snage vjetroelektrana [3]

### 3. VJETROTURBINE

Vjetroturbina mehanički je uređaj koji energiju vjetra pretvara u električnu energiju. One su projektirane za pretvaranje kinetičke energije vjetra u mehaničku, pri čemu dolazi do kretanja osi. Zatim se u generatoru turbine ta mehanička energija pretvara u električnu energiju. Proizvedena energija može se pohraniti u bateriju ili izravno koristiti. [4]

Prednosti rada vjetroturbina:

- Iskorištavaju obnovljiv izvor energije
- Iskorištavaju potpuno čist i siguran izvor energije, odnosno nema nikakve emisije štetnih plinova za atmosferu
- Olakšavaju energetske neovisnost – to je energija koja se iskorištava u svojoj zemlji, te na taj način izbjegavamo uvoz iz drugih zemalja
- Mogu imati umjereno pozitivan utjecaj na smanjenje brzine vjetra na područjima koja su izložena jakim vjetrovima

Nedostaci rada vjetroturbina:

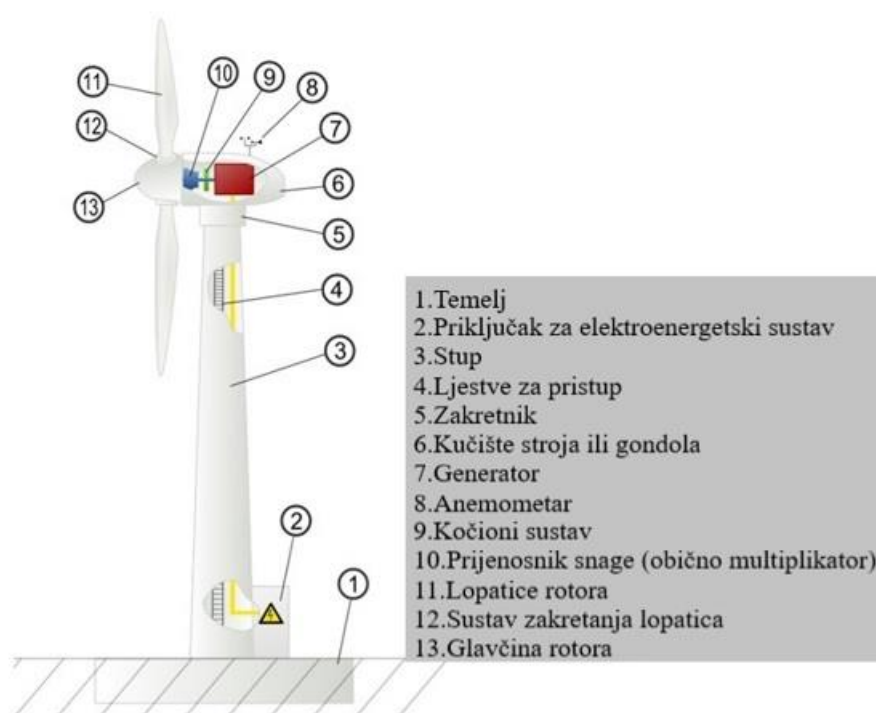
- Rad je ovisan o meteorološkim obilježjima lokacije
- Dolazi do povećanja erozija, jer se obližnja površina tla isušuje
- Prevelika buka pa se iz tog razloga pretežito postavljaju u nenaseljenim područjima
- Trenutno još nisu projektirani sustavi koji bi mogli skladištiti energiju u značajnim količinama

#### 3.1. Glavni dijelovi vjetroturbine

Sklop vjetroturbine i električnog generatora naziva se vjetroatregat. Vjetroturbina ili rotor sastoji se od glavčine, vratila i lopatica. Ovisno o načinu reguliranja snage, rotor se može izraditi na dva načina.

Prvi način je reguliranje napadnog kuta lopatica okretanjem lopatica. Lopatice se zakreću kako bi profil bio u optimalnom položaju. Općenito, ova vrsta regulacije je prilično složena i skupa te se koristi za lopatice duljine od 25 do 30 metara.

Druga je vrsta regulacije putem aerodinamičkog učinka. S promjenama brzine vjetra, sila uzgona povećava se ili smanjuje. Kod ove vrste regulacije snage lopatice rotora nisu zakretne, ali su vjetroturbine projektirane za odgovarajući raspon brzina i imaju unaprijed zadani kut kako bi se iskoristila najveća moguća pretvorba energije vjetra u električnu energiju. Dijelovi vjetroatregata prikazani su na slici 3.1.



*Slika 3.1. Dijelovi vjetroatregata [5]*

Temelj je najniži konstruktivni element konstrukcije, sprječava prevrtanje vjetroatregata pod utjecajem ekstremnih brzina vjetra.

S obzirom na priključak na elektroenergetski sustav vjetroelektrane mogu biti: izravno priključene na mrežu i u verziji s konstantnom brzinom vrtnje ili u verziji s promjenjivom ili polupromjenjivom brzinom vrtnje.

Vjetrovi su sporiji uz površinu Zemlje, a korištenjem stupa za podizanje rotora na visinu brzih vjetrova, proizvodnja energije se povećava. Stup je najčešće cjevaste izvedbe, ali može biti i rešetkaste izvedbe. U stupu se nalaze ljestve, a u većim izvedbama nalazi se dizalo. U podnožju se nalazi transformator preko kojeg se vjetroturbina spaja na srednjenaponsku mrežu. Ljestve za

pristup omogućuju pristup vrhu vjetroagregata radi popravka i održavanja elemenata. Zakretnik služi za rotaciju turbinskog ili generatorskog sustava niz vjetar. Nalazi se ispod kućišta. Zakretnik izravna os vratila rotora preko pužnog prijenosa s zupčastim prestenom. Sastoji se od motora i kočnice koja sprječava zakretanje kućišta u naletima vjetra.

Generator je električni stroj koji mehaničku energiju pretvara u električnu energiju. Generatori su posebne izvedbe jer rade s promjenjivom snagom. Generatori su zračno hlađeni i podmazivani sintetičkim uljem. Vjetroturbine mogu biti opremljene bilo kojom vrstom trofaznog generatora no najčešće su to asinkroni (indukcijski) i sinkroni generator. Asinkroni generatori koriste se za jaku distribucijsku mrežu dok sinkroni generatori za slabu ili prienosnu mrežu. Asinkroni također imaju prednost iz razloga što su mehanički jednostavniji i imaju nižu cijenu. Kućište je uređaj koji štiti generator od utjecaja okoliša i štiti okoliš od buke koju stvara instalacija.

Anemometar je mjerni uređaj za mjerenje jačine i brzine vjetra. Mjerenje vjetra provodi se na visini od 10 metara kako bi se izbjegli negativni učinci miješanja vjetra pri tlu. Brzina se izražava u  $\frac{km}{h}$ ,  $\frac{m}{s}$  ili čvorovima. Anemometar se koristi za prikupljanje podataka o brzini i smjeru vjetra, koji se koriste za izradu ruže vjetrova za određeno područje. Anemometar s lopaticama najčešća je korištena vrsta, ali također se koriste ultrazvučni anemometri, anemometri s ugrijanom žicom, Pitotov anemometar i laser doppler anemometar.

Kočioni sustav služi za rasterećenje prijenosa snage, tj. zaustavljanje rotora ako brzina udara vjetra premaši maksimalnu vrijednost (kočioni sustav ima graničnu vrijednost, npr. 30 m/s). Prije korištenja kočnica, potrebno je smanjiti brzinu rotora kako bi se izbjeglo prekomjerno zagrijavanje i mogući požar. Zadaća kočnog sustava je i održavanje projektirane brzine konstantom. Najčešća verzija kočionog sustava je disk kočnica.

Prijenosnik snage ima zadatak pretvarati nižu brzinu rotora u veću brzinu rotora potrebnu elektrogeneratoru. Sastoji se od sustava zupčanika koji povezuje osovinu rotora i generator.

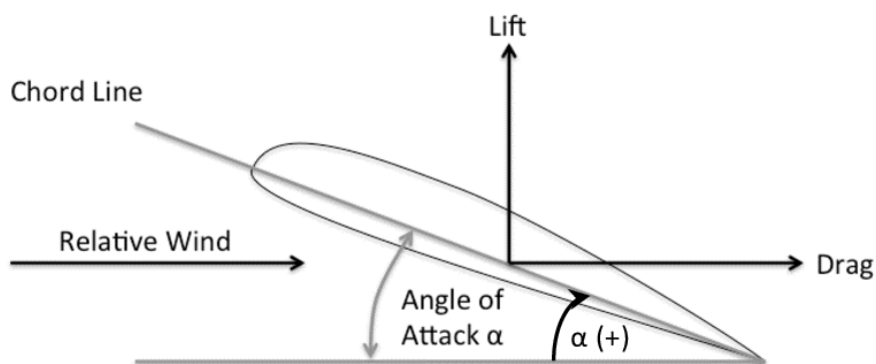
Lopaticice rotora pokreće aerodinamički uzgon te imaju visok stupanj pretvorbe energije vjetra u mehanički rad. Najpraktičnija i najjeftinija konfiguracija je s 3 lopaticice. Kod vjetroagregata s dvije ili jednom lopaticom brzina vrtnje je znatno veća, što negativno utječe na učinkovitost.

Sustav zakretanja lopatica je sustav koji koristi brzinu vjetra, brzinu generatora i podatke o proizvodnji električne energije za promjenu položaja lopaticice zbog povećane proizvodnje i sprječavanja zamora materijala.

Glavčina rotora pričvršćena je na osovinu rotora te se okreće s lopaticama. Složenije vjetroturbine imaju dodatni element sustava rotacije lopatica, dok su u jednostavnijim izvedbama lopatice pričvršćene direktno na glavčinu rotora i nemaju mogućnost rotacije lopatice.

### 3.2. Načelo rada vjetroturbine

Rad vjetroatregata temelji se na dva načela iskorištavanja energije vjetra: načelo uzgona (eng. *lift*) i načelo otporna djelovanja (eng. *drag*). Načelo uzgona funkcionira na način da se protok zraka iznad lopatica kreće brže od protoka ispod lopatica, što rezultira razlikom tlaka s gornje i donje strane lopatica. Uzgon je sila koju stvara razlika u tlaku te se zbog uzgona rotor vjetroatregata okreće. Javlja se i sila otpora u smjeru kretanja zraka. Kod načela otpornog djelovanja rotor je oblikovan tako da jedna strana, u odnosu na os rotacije, pruža veći otpor kretanju vjetra nego druga strana. Zbog razlike u otporu, rotor se okreće u smjeru većeg momenta. Kod ovog načela iskoristivost vjetroatregata manja je nego kod načela uzgona, a pretežno se koriste agregati koji rade na načelu uzgona ili agregati koji radi na kombinaciji oba načela.



Slika 3.2. Prikaz sila koje djeluju na profil lopatica[6]

### 3.3. Koeficijent snage

Koeficijent snage proizlazi iz odnosa snage turbine i snage vjetra. Betzov limit koristi se za usporedbu koeficijenata snage. Predstavlja maksimalnu teoretsku učinkovitost pretvaranja snage vjetra u snagu vjetroatregata. Betzov limit dobiven je sljedećom jednađbom.



$$C_{p,Max} = \frac{P_{max}}{P_{vjetar}} = \frac{\frac{16}{27} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_2 \cdot v_1^3}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_2 \cdot v_1^3} = \frac{16}{27} = 0,593 \quad [1] \quad (3.1)$$

gdje je:

$C_{p,max}$  koeficijent snage,

$P_{max}$  snaga turbine [W],

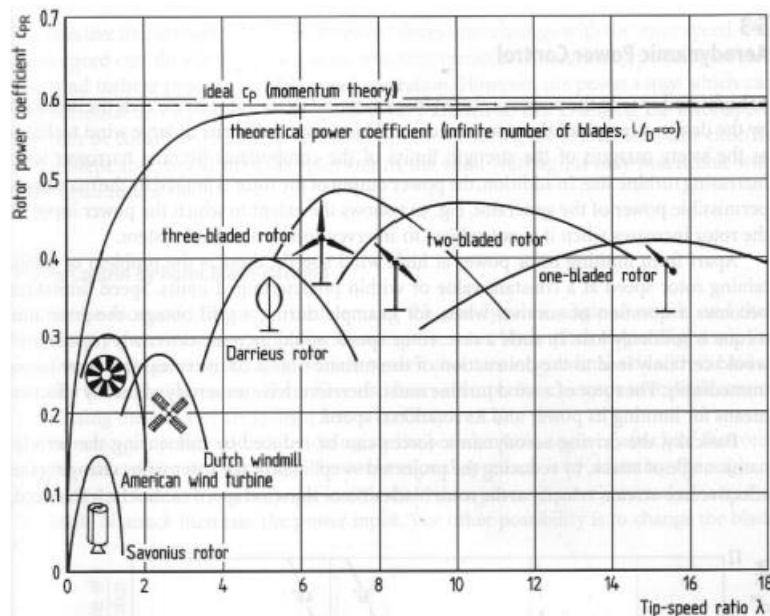
$P_{vjetar}$  snaga vjetra [W],

$A$  površina rotora [ $m^2$ ],

$\rho$  gustoća zraka [ $kg/m^3$ ],

$u$  brzina vjetra [m/s].

Betzov limit iznosi 0,593, dok današnje moderne vjetro turbine imaju faktor iskoristivosti do 0,5. Vjetro turbine s 3 lopatice imaju najveću učinkovitost, dok Darrieusova vjetro turbina ima stupanj učinkovitosti oko 0,4. (Slika 3.3)



Slika 3.3. Koeficijent iskoristivosti vjetro turbine [1]

Omjer brzine vjetra/vrha  $\lambda$  (eng. tip speed ratio) je omjer između tangencijalne brzine vrha lopatice i stvarne brzine vjetra. Omjer brzine dobiva se sljedećom formulom:

$$\lambda = \frac{\omega \cdot R}{u} \quad (3.2)$$

gdje je:

$\omega$  kutna brzina rotora [rad/s],

$R$  radijus rotora [m],

$u$  brzina vjetra [m/s]

### 3.4. Vrste vjetroturbina

Vjetroturbine je moguće kategorizirati s obzirom na različite značajke te u nastavku su navedene neke od tipičnih podjela. Dijelimo ih prema:

- Položaju osi turbinskog kola: vjetroturbine s vodoravnom osi i okomitom osi
- Omjeru brzine najudaljenije točke rotora i brzine vjetra: brzohodne i sporohodne
- Načinu pokretanja: samokretne i nesamokretne
- Broju lopatica: s jednom lopaticom, s nekoliko i višelopatične
- Iskoristivosti pretvorbe energije vjetra u zakretni moment: nisko i visoko učinkovite
- Načinu okretanja rotora prema brzini vjetra: promjenjive i nepromjenjive

#### 3.4.1. Vjetroturbine s vodoravnom osi

HAWT (*eng. horizontal axis wind turbine*) najčešći je dizajn vjetroatregata koji se danas koristi. Imaju osovinu glavnog rotora i električni generator na vrhu tornja. Turbine s vodoravnom osi koriste aeroprofile montirane na rotor, koji se može postaviti niz vjetar ili prema vjetru. HAWT se najčešće sastoje od dvije ili tri lopatice, ali postoje i verzije s jednom ili više lopatica.[7]



*Slika 3.4. Primjer vjetroturbine s vodoravnom osi [8]*

Prednosti vjetroturbina s vodoravnom osi:

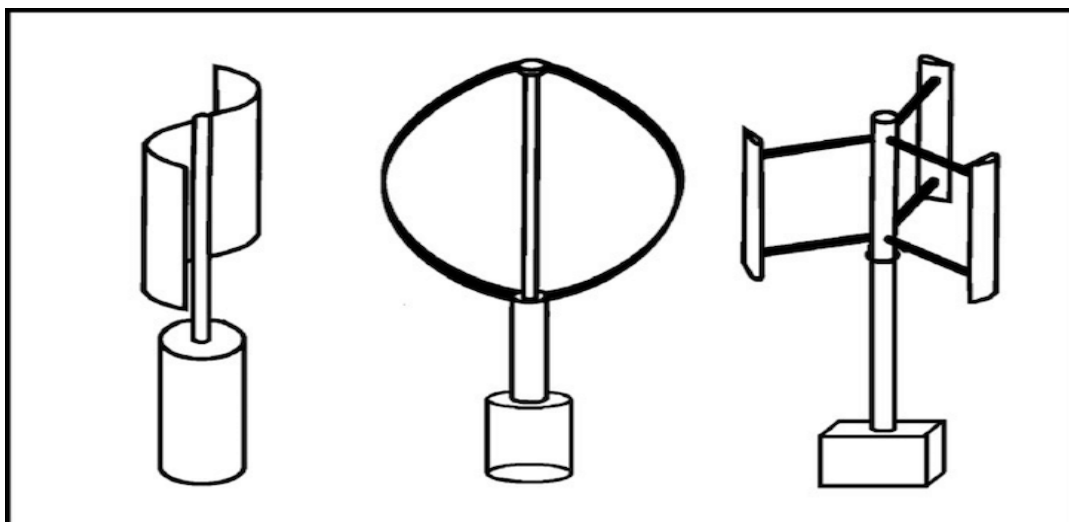
- Visoki tornjevi omogućuju veliku brzinu rada
- Visoka učinkovitost i izlazna snaga
- Visoka pouzdanost

Nedostaci vjetroturbina s vodoravnom osi:

- Potrebna je masivna konstrukcija tornjeva za podupiranje generatora, rotora i lopatica pri vrhu
- Visoki troškovi transporta, instalacije i održavanja
- Zahtijevaju dodatni mehanizam za kontrolu okretanja lopatica prema vjetru
- Zahtijevaju uređaj za kočenje kako bi se spriječilo uništavanje ili oštećenje turbine pri naletima jakog vjetra

### 3.4.2. Vjetroturbine s okomitom osi

VAWT (*eng. Vertical axis wind turbine*) imaju osovinu glavnog rotora postavljenu okomito. Iz tog razloga vjetroturbina ne mora biti usmjerena u smjeru vjetra, što znači da senzori vjetra i uređaj za centriranje nisu potrebni. Osnovni koncepti rotora vjetroturbina s okomitom osi su: Savoniusov rotor, Darrieusov rotor i H rotor.



Slika 3.5. Savoniusov, Darrieusov i H rotor [9]

Prednosti vjetroturbina s okomitom osi:

- Vjetroturbina je smještena na dnu, što olakšava održavanje njezinih dijelova
- Imaju niže brzine pokretanja vjetrom
- Nisu potrebni nikakvi mehanizmi skretanja, niti uređaji za praćenje i okretanje
- Mogu proizvoditi električnu energiju u bilo kojem smjeru vjetra

Nedostaci vjetroturbina s okomitom osi:

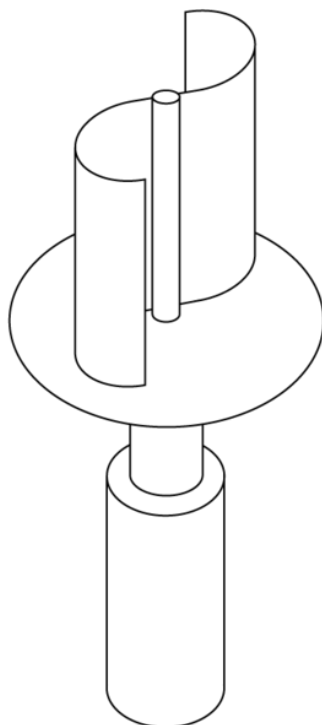
- Manje učinkovite u usporedbi s vjetroturbinama s horizontalnom osi zbog dodatnog otpora koji nastaje kada se njihove lopatice rotiraju
- Problemi sa samopokretanjem
- Rotori su smješteni blizu tla gdje su brzine vjetra niže
- Imaju relativno visoke vibracije jer strujanje zraka pri tlu stvara turbulentno strujanje

### **3.5. Savoniusova vjetroturbina**

Uz Darrieusovu vjetroturbinu, Savoniusova najpoznatija je vjetroturbina s okomitom osi. Nastala je 1922. godine, a izumio ju je finski inženjer Sigurd Johaness Savonius. Savoniusova vjetroturbina jedna je od najjednostavnijih vjetroturbina, a sastoji se najčešće od dvije lopatice, iako postoji i izvedba s tri lopatice.

Savoniusova vjetroturbina ima specifičan način rada. Izvedba s dvije lopatice oblikom podsjeća na slovo „S“. Zbog zakrivljenosti lopatica rotacija se uvijek odvija u smjeru većeg opterećenja. U slučaju Savoniusove vjetroturbine, veće opterećenje nastaje kada se lopatice okreću u smjeru vjetra. Prednost ove vjetroturbine je to što nije bitno iz kojeg smjera puše vjetar jer će jedna od lopatica uvijek biti pravilno okrenuta te će doći do pokretanja vjetroturbine. Nedostatak ove vjetroturbine je mali koeficijent iskoristivosti koji se kreće oko 15%.

## Savonius-Rotor



*Slika 3.6. Savoniusova vjetrotubina s dvije lopatice [11]*

### **3.6. Darrieusova vjetroturbina**

Francuski inženjer zrakoplovstva Georges Jean Marie Darrieus 1929. godine patentirao je vertikalnu vjetroturbinu prema kojoj su kasnije stvoreni drugi dizajni. Dvije do tri lopatice aerodinamičkog profila raspoređene su oko rotirajućeg vratila. Rad turbine neovisan je o smjeru vjetra i pokazuje veću učinkovitost u turbulentnim poljima (lopatice imaju veću brzinu nego vjetar). Velika postrojenja skupa su i zahtijevaju veliki prostor te ih zbog toga nećemo vidjeti u urbanim područjima. Alternativa je Darrieusova vjetroturbina koja svojom manjom konstrukcijom daje mogućnost pretvorbe vjetra u električnu struju unutar urbanih područja.

Neke od prednosti Darrieusove vjetroturbine su: jednostavnost održavanja, jednostavna izrada oštrica, manja buka pri radu itd. Nedostatak kod Darrieusove vjetroturbine tiče se samopokretanja kad rotor miruje te često je potreban vanjski izvor energije za pokretanje turbine kako bi se stvorio okretni moment. Drugi veliki nedostatak je da se napadni kut stalno mijenja kako se turbina okreće. Stvara se sinusoidalni ciklus opterećenja, koji se mora kontrolirati kočnicama kako se lopatice ne bi slomile.

Postoji nekoliko tipova Darrieusovih vjetroturbin:

- Darrieusova vjetroturbina s ravnim lopaticama
- Darrieusova vjetroturbina sa spiralnim lopaticama
- Darrieusova vjetroturbina s J-lopaticama
- Hibridna Savonius-Darrieus vjetroturbina

### 3.6.1. Darrieusova vjetroturbina s ravnim lopaticama

Izvedba rotora s dvije lopatice naziva se H-rotor, a izvedba s više lopatica naziva se Giromill. Broj lopatica važan je faktor jer određuje kapacitet snage. Darrieusova vjetroturbina s ravnim lopaticama najjednostavniji je tip rotora zato što ga je najlakše proizvesti i instalirati.



*Slika 3.7. Darrieusov H-rotor [10]*

Bitno je spomenuti da ovakve izvedbe Darrieusove vjetroturbinine nisu poželjne za urbana područja jer se ne mogu samostalno pokrenuti pri brzinama ispod 4 m/s. Osim toga, nedostatak im je i brzina rotacije. Sporije su od vjetroturbinina s horizontalnom osi vrtnje. Stoga zahtijevaju veći generator za isti kapacitet snage.

### 3.6.2. Darrieusova vjetroturbina sa spiralnim lopaticama

Prednosti vjetroturbine sa spiralnim lopaticama u usporedbi s vjetroturbinom s ravnim lopaticama su: bolja sposobnost samopokretanja, manja buka, lopatice imaju duži tijek trajanja te se lopatice manje naprežu i imaju manje vibracije. S druge strane, nedostatak ovakve izvedbe visoka je cijena izrade spiralnih lopatica. Izrađuju se jedino strojnom obradom, a potom se prešaju u kalupe. Učinkovitost energije vjetra ove turbine je oko 35%.



*Slika 3.8. Darrieusova vjetroturbina sa spiralnim lopaticama [10]*

### 3.6.3. Darrieusova vjetroturbina s J-lopaticama

Lopatice ovakvog profila nastaju uklanjanjem kompresijskog dijela profila te zbog toga imaju veći početni moment i povećani moment vrtnje pri niskim brzinama vjetra. Još jedna prednost tiče se jednostavnosti profila lopatica što rezultira nižim troškovima proizvodnje. One se izrađuju od aluminijskoga lima te se nakon isteka roka trajanja mogu reciklirati.



*Slika 3.9 Darrieusova vjetroturbina s J-lopaticama [10]*

#### 3.6.4. Hibridna Savonius-Darrieus vjetroturbina

Savoniusove turbine poznate su po većem startnom momentu, dok se Darrieusove turbine subverzivno gledaju zbog slabog startnog momenta. Kombinacijom ova dva rotora kompenziraju se njihovi nedostaci. Pri malim brzinama do 3 m/s hibridna vjetroturbina ima karakteristike Savoniusova rotora, a pri brzinama većim od 4 m/s ima karakteristike Darrieusova rotora. Zbog neusklađenosti izvođenja ova dva rotora problem nastaje kad se nalaze na istom vratila zato što jedan drugom smanjuje izvedbu. Zbog tih problema ovaj je tip motora još uvijek u procesu istraživanja.[10]





*Slika 3.10. Hibridna Savonius-Darrieus vjetroturbina [10]*

## 4. RAČUNALNA DINAMIKA FLUIDA

Računalna dinamika fluida ili CFD (*eng. Computational Fluid Dynamics*) grana je mehanike fluida koja koristi numeričku analizu i strukture podataka za analizu i rješavanje problema povezanih s protokom fluida. [12]

Razvojem računala stvoreni su uvjeti za numeričko rješavanje matematičkih modela koji opisuju strujanje fluida, a time je započeo i razvoj treće grane mehanike fluida – računalne dinamike fluida. Simulacija počinje definiranjem problema i izborom odgovarajućeg matematičkog modela. Matematički model uglavnom je predstavljen sustavom parcijalnih diferencijalnih jednadžbi. Svaki takav sustav jednadžbi ima opće rješenje, a posebno rješenje definirano je početnim i rubnim uvjetima specifičnim za problem koji se promatra. Kod rada s komercijalnim programom (kao u ovom slučaju s programom FLUENT) matematički model već je ugrađen u računalni program i korisnik, putem sučelja, može odabrati podvarijantu modela koja odgovara njegovom problemu.

Sljedeći korak u numeričkoj simulaciji je numeričko rješavanje zadanog matematičkog modela. Računalna domena je diskretizirana, a rezultat diskretizacije prostora naziva se geometrijskom mrežom. Na geometrijskoj mreži potrebno je riješiti parcijalne diferencijalne jednadžbe matematičkog modela s obzirom na specifične rubne uvjete. Raspisane parcijalne jednadžbe za danu domenu definiraju sustav algebarskih jednadžbi. Nelinearni sustav jednadžbi rješava se kroz iterativni proces koji uključuje rješavanje sustava linearnih algebarskih jednadžbi. Nakon dobivanja numeričkog rješenja slijedi njegova analiza koja uključuje prikaz skalarnih, vektorskih i tenzorskih polja, integraciju protoka sila, momenata, toplinskih tokova i sl. te shematski prikaz željenih veličina. [13]

Računalna dinamika fluida ima mnoge prednosti u odnosu na eksperimentalni pristup jer smanjuje vrijeme projektiranja, jeftinija je i troši manje energije, može simulirati uvjete koji se ne mogu ostvariti u eksperimentu i pruža potpuniju sliku polja u protoku. Princip rada računalne simulacije dinamike fluida temelji se na rješavanju Navier-Stokes jednadžbi. Te su jednadžbe parcijalne diferencijalne jednadžbe koje povezuju temperaturu, brzinu, tlak i gustoću fluida u kretanju, a sastoje se od jednadžbi za očuvanje količine gibanja, mase i energije u odnosu na vrijeme. Osim u strojarstvu, CFD simulacije koriste se u mnogim područjima studija i industrijama

poput zrakoplovstva, biološkog inženjerstva, medicine, automobilske industrije, elektroničke industrije itd.

3D CFD simulacije općenito daju preciznije rezultate od 2D simulacija, no smatraju se nepraktičnima za vjetroturbine s okomitom osi zbog prevelikih računskih zahtjeva čak i kada se primjenjuju grube mreže.

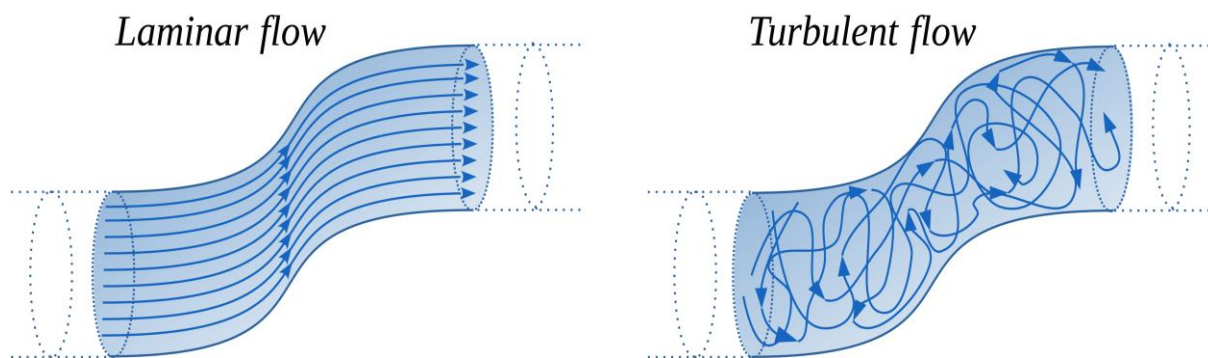
Simulacija će se provoditi u programu ANSYS Fluent te se sastoji od sljedećih 5 koraka:

1. Definiranje geometrije
2. Izrada numeričke mreže (diskretizacija elemenata)
3. Definiranje rubnih uvjeta
4. Računanje Navier-Stokesovih jednažbi
5. Vizualizacija

#### **4. 1. Teoretska osnova**

Laminarno ili turbulentno strujanje fluida može se opisati Navier-Stokes-ovim jednadžbama sve dok se fluid može smatrati kontinuumom. Ove jednadžbe opisuju ponašanje fluidnih čestica pri makroskopskoj razini zanemarujući molekularnu strukturu materije i molekularna gibanja molekula. Ponašanje fluida može se opisati značajkama koje su karakteristične za makroskopska mjerila kao što su brzina, tlak, gustoća, temperatura i njihove vremenske i prostorne derivacije.[14]

Kod laminarnog strujanja slojevi klize jedan preko drugog pri čemu ne dolazi do miješanja čestica fluida, dok kod turbulentnog strujanja dolazi do izmjene čestica između slojeva i stvaranja vrtloga. Dobar primjer turbulentnog strujanja je strujanje vode oko brodova koji plove. Turbulentno strujanje karakterizira se kao gubitak energije, ali je neophodno u industriji zato što turbulentni proces učinkovito izmjenjuje masu, toplinu i moment.



Slika 4.1 Laminarno i turbulentno strujanje[16]

Reynoldsov broj kriterij je koji se koristi za određivanje vrste protoka koji se dogodio u danim okolnostima. Britanski fizičar Osborne Reynolds eksperimentima je utvrdio da je strujanje laminarno pri vrijednosti Reynoldsovog broja nižeg od 2300, dok je strujanje turbulentno pri vrijednosti Reynoldsovog broja većeg od 2300. Reynoldsov broj je bezdimenzijska značajka i dobiva se sljedećom jednadžbom (4.1)

$$Re = \frac{\rho * v * l}{\eta} \quad (4.1)$$

gdje je:

$\rho$  gustoća fluida [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],

$v$  najveća brzina strujanja fluida [ $\text{m}/\text{s}$ ],

$l$  duljina [ $\text{m}$ ],

$\eta$  dinamička viskoznost fluida [ $\text{kg}/\text{ms}$ ]

Strujanje fluida opisuje se jednadžbama očuvanja mase, količine gibanja i energije. Ponekad je u strujanje nestlačivog fluida bez prijenosa topline moguće uvesti dodatno pojednostavljenije matematičkog modela izostavljanjem jednadžbe očuvanja energije. Tada se sustav jednadžbi očuvanja svodi na jednadžbe očuvanja mase i količine gibanja. Jednadžba očuvanja mase, ili jednadžba kontinuiteta, glasi:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{u}) = S_m \quad (4.2)$$

gdje  $S_m$  predstavlja izvore i ponore mase.

Ovakav opis jednadžbe očuvanja vrijedi za kompresibilni fluid, ali i za nekompresibilni fluid. Jednadžba očuvanja količine gibanja fluida u inercijskom koordinatnom sustavu je sljedeća:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{u}\vec{u}) + \nabla p + \nabla(\tau) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (4.3)$$

gdje je  $p$  statički tlak,  $\tau$  tenzor naprezanja,  $\rho \vec{g}$  gravitacijska volumna sila, a  $\vec{F}$  vanjska masena sila. [14]

Za Newtonovski fluid viskozna naprezanja proporcionalna su brzini smičnog naprezanja. Ta se naprezanja  $\tau_{ij}$  mogu izraziti pomoću gradijenta brzine i svojstava fluida. Ako se tako izražena naprezanja uvrste u diferencijalnu jednadžbu gibanja proizlaze Navier-Stokesove jednadžbe gibanja. Uz pretpostavku nestlačivog strujanja i konstantne viskoznosti, Navier Stokesove jednadžbe u vektorskom obliku su:

$$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = -grad p + \mu \nabla^2 \vec{v} + \rho \vec{f} \quad (4.4)$$

gdje član na lijevoj strani predstavlja silu inercije, prvi i drugi član desne strane predstavljaju kontaktne sile i to normalne (tlak) i smične te zadnji član desne strane predstavlja masenu silu. [15]

## 4. 2. Turbulencija

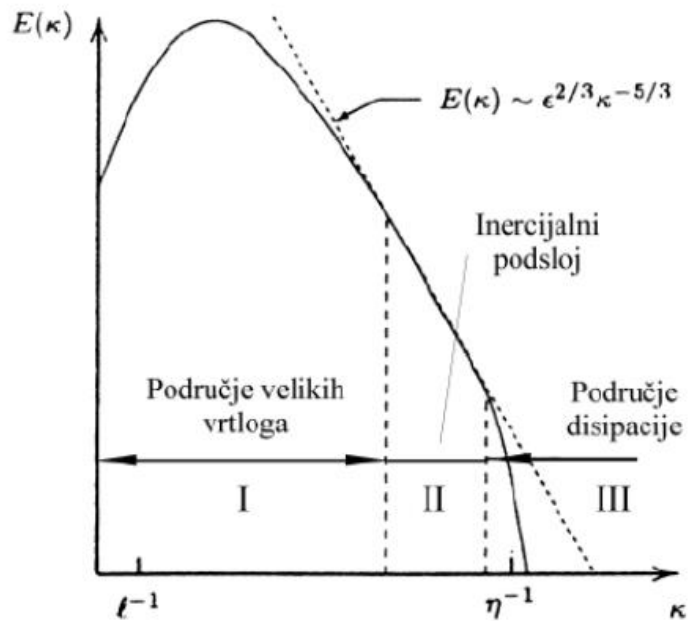
Turbulencija nema klasičnu definiciju, ali ima niz karakterističnih značajki:

- turbulentno strujanje je nepravilno, slučajno i kaotično
- turbulentno strujanje karakteristično je za velike Re brojeve
- turbulentno strujanje je disipativno
- najmanje turbulentne skale su mnogo veće od molekularnih skala te se i kod turbulentnog strujanja fluid može smatrati kontinuumom [14]

Turbulencija se analizira preko spektralne distribucije energije koja predstavlja Fuierovu dekompoziciju u valne brojeve  $\kappa$  ili valne duljine gdje je:

$$\lambda = \frac{2\pi}{\kappa} \quad (4.5)$$

Tipičan energetski spektar karakterističan za turbulentno strujanje prikazan je na slici 4.2.:



Slika 4.2. Energetski spektar turbulentnog strujanja[14]

Područje I predstavlja skalni spektar najvećih vrtloga. Najveći vrtlozi su reda veličine geometrije problema i izvlače energiju iz glavnog toka koju kaskadnim procesom prenose na manje vrtloge. Orijentacija definirana glavnim strujanjem karakteristična je za najveće vrtloge. Karakteristične skale u ovome području su duljinska skala  $l$  i skala brzine  $u$ . [14]

Područje II je područje prijenosa energije u kaskadnom procesu, gdje energija velikih vrtloga, izvorno preuzeta iz glavnog toka, tone u područje disipacije kroz kaskadni proces. Kaskadni proces neovisan je o najvećim i najmanjim vrtlozima. Transfer energije dominiran je inercijom pa se energija  $E(\kappa)$  može okarakterizirati disipacijom  $\epsilon$  i veličinom vrtloga  $\frac{1}{\kappa}$ . Ova pretpostavka naziva se Kolmogorovljevom pretpostavkom, a dimenzijska analiza daje:

$$E(\kappa) = C_{\kappa} \epsilon^{\frac{2}{3}} \kappa^{-\frac{5}{3}} \quad (4.6)$$

gdje je:

$$\frac{1}{l} \ll \kappa \ll \frac{1}{\eta} \quad (4.7)$$

pri čemu je  $C_{\kappa}$  Kolmogorovljeva konstanta. Ovaj zakon se naziva Kolmogorovljev zakon ili  $-\frac{5}{3}$  zakon. [14]

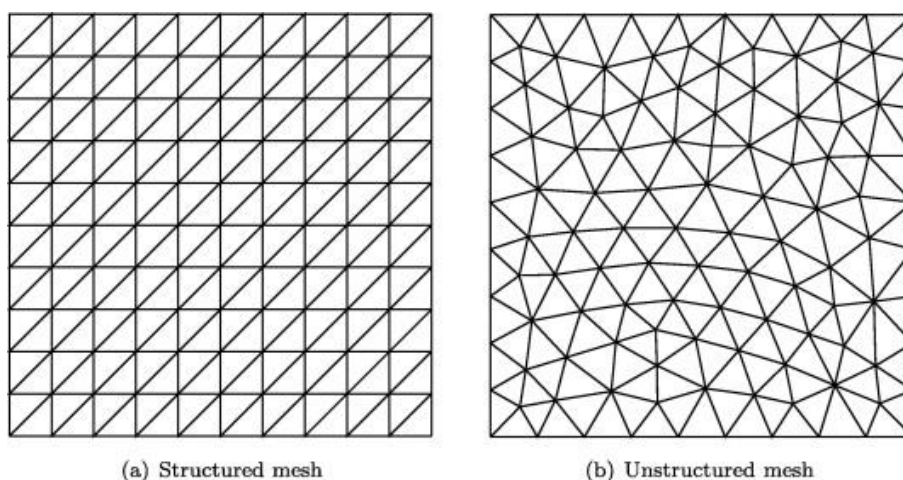
Područje III se naziva područje disipacije. To je područje gdje nastaje disipacija, odnosno proces pretvorbe turbulentne kinetičke energije, posredstvom molekularne viskoznosti u toplinu. Pretvorba energije, posredstvom molekularne viskoznosti, u toplinu vrši se u svim područjima spektra energija, no u ovom je području najintenzivnija. [14]

### 4.3. Numeričke mreže

Numerička mreža predstavlja diskretizaciju prostora s konačnim elementima. To jest, domena toka fluida diskretizirana je u konačni broj jednostavnijih elemenata koji čine numeričku mrežu, a zatim se rješavaju parcijalne diferencijalne jednačbe unutar svakog elementa. Postoji nekoliko metoda za diskretizaciju prostora, ali u CFD simulaciji koristit ćemo metodu konačnih volumena.

Dijelimo numeričke mreže na strukturirane i nestrukturirane mreže. Strukturirane mreže prepoznaju se redovitim povezivanjem te mogući izbori elemenata su četverokuti za 2D i heksaedri za 3D. Prednost strukturiranih mreža je bolja konvergencija no njihova izrada je složenija. Posljedično, nisu primjenjive za izrazito kompleksne domene.

Nestrukturirana mreža sadrži elemente koji ne čine ponavljajući uzorak te se prilagođavaju geometriji. Prednost nestrukturiranih mreža jest mogućnost povećavanja gustoće elementa na detalju domene. Povećavanjem gustoće poboljšava se točnost simulacije. U CFD simulaciji koristit ćemo nestrukturiranu mrežu kako bi preciznije definirali geometriju oko NACA aeroprofila.



Slika 4.3. Primjer strukturirane i nestrukturirane mreže [17]

## 5. Problematika

U svrhu analize performansi Darrieusove turbine razmatrati ćemo izvedbe s tri lopatice. S internetske stranice [18] preuzeti su aeroprofil koji će se koristiti u simulaciji. Uspoređuju se NACA0015, NACA0018 i NACA0022 aeroprofil. Prva znamenka predstavlja postotak maksimalnog nagiba, druga predstavlja maksimalan položaj nagiba te zadnje dvije predstavljaju postotak debljine. Dužina tetive aeroprofila postavljena je na 1000 mm te prije pokretanja simulacije potrebno ju je skalirati pomoću Excell programa na zadanu dužinu tetive. Sva tri aeroprofila simetrična su te zbog toga su strujanje i raspodjela tlaka simetrično raspodijeljena na obje strane lopatica.

Tablica 5.1. Konfiguracija vjetroturbine

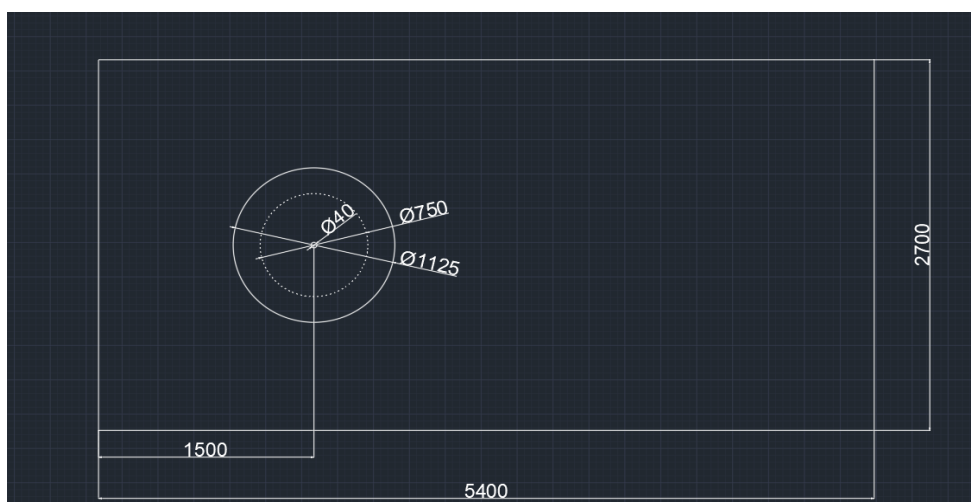
|                             |                              |
|-----------------------------|------------------------------|
| Aeroprofil                  | NACA0015, NACA0018, NACA0022 |
| Broj lopatica               | 3                            |
| Dužina tetive lopatice [mm] | 83                           |
| Duljina lopatice [mm]       | 1000                         |
| Promjer osi rotora [mm]     | 40                           |
| Radijus rotora [mm]         | 375                          |

U ovom radu, geometrija je napravljen u *Workbench* programu, kao i numerička mreža, dok je simulacija rađena u programu *Ansys Fluent*. Uspoređeni su koeficijenti uzgona za tri različita aeroprofila te je napravljena i usporedba koeficijenata uzgona za rad samo jedne lopatice na vjetroturbini. Za različite omjere brzina vjetra dobiveni su koeficijenti snage te uspoređeni za svaki aeroprofil.

### 5.1 Geometrijske značajke

Računska domena se sastoji od dva dijela: Unutarnje kružne domene koja se rotira, te vanjske pravokutne domene za stacionarno područje. Rotacijska kružna domena ima radijus  $1,5r$  odnosno 562,5 mm, dok stacionarna ima dimenzije  $14,4r$  i  $7,2r$  odnosno 5400 mm i 2700 mm. Ovakve dimenzije za stacionarnu domenu uzete su iz razloga što izbjegavaju bilo kakav efekt blokade i omogućuju potpuno razvijeno strujanje.

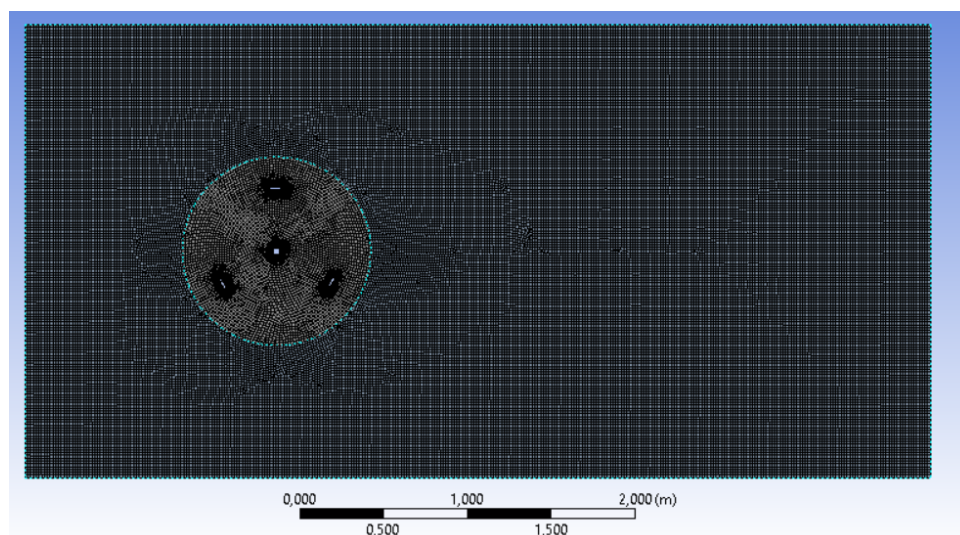




*Slika 5.1. Dimenzije računске domene*

## 5.2. Izrada numeričke mreže

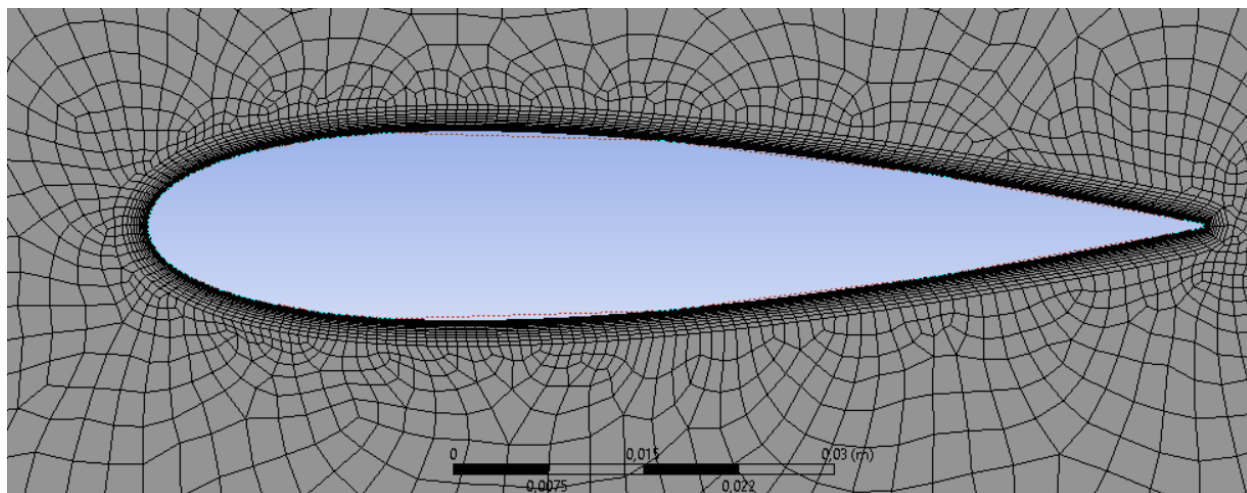
Za svrhu CFD simulacije veličina elemenata smanjena je na 0,0166 m. na slici 5.2. prikazana je numerička mreža koja se koristi u CFD simulaciji te se sastoji od ukupno 69 000 elemenata.



*Slika 5.2. Numerička mreža koja se koristi u CFD simulaciji*

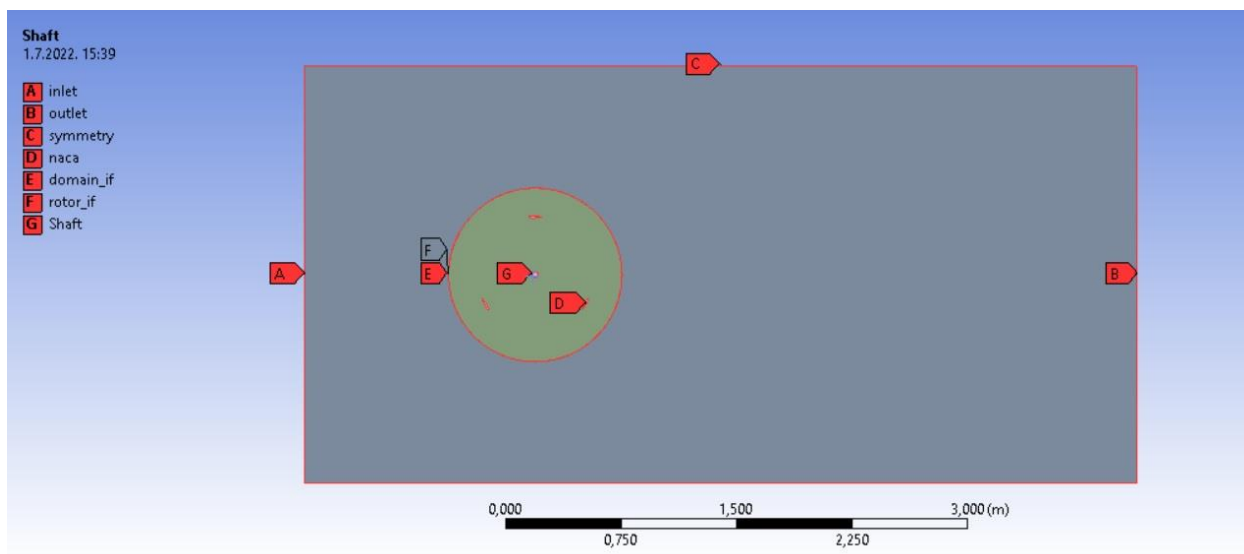
Brzina strujanja uz zid je nula. Kako bi se uhvatili gradijenti koji se javljaju kako se odmičemo od zida, postavljamo opciju inflacije oko aeroprofila, to jest kreiramo ugušćenje sa

rubnim slojevima (*eng. boundary layers*). Uzimamo opciju inflacije: „First Layer Thickness“ od 15 slojeva, sa stupnjem rasta od 1,2 i visinom prvog elementa 0,000028 m. Ti dodatni elementi oko aeroprofila će nam pomoći da detaljnije i preciznije pokažemo tu naglu promjenu brzine. Numerička mreža uz opciju inflacije prikazana je na slici 4.7.



Slika 5.3. Inflacija oko lopatice aeroprofila

Zatim postavljamo nazive za rubne uvjete u stacionarnoj i rotacijskog domeni u kojima ćemo definirati početne brzine u postavkama simulacije. Rubne uvjete postavljamo na ulazu u domenu, izlazu, bočnim zidovima, aeroprofilu (u ovom slučaju NACA0018) i rotacijskoj domeni.



Slika 5.4. Rubni uvjeti

### 5.3. Postavke u Fluentu i definiranje rubnih uvjeta

Prije pokretanja simulacija u programu Fluent, prvo provjeravamo na funkciji general jesu li nam granice domene i numerička mrežu u redu. U CFD simulaciji, model turbulencije ključni je parametar koji utječe na resultantno strujno polje. Parametar koji odaberemo je  $k-\omega$  model turbulencije koji se sastoji od dvije parcijalne jednačbe s dvije varijable kojima pokušava zatvoriti Navier-Stokesove jednačbe. Varijabla  $k$  predstavlja kinetičku energiju turbulencije, dok varijabla  $\omega$  predstavlja specifičnu brzinu disipacije turbulencije. Za radni fluid postavljamo zrak, koji ima gustoću od  $1,225 \text{ kg m}^{-3}$  i viskoznost od  $1,7894 * 10^{-5} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ .

Sljedeći korak je postavljanje rubnih uvjeta. Rubni je uvjet zahtjev na vrijednost rješenja diferencijalne jednačbe na rubu domene. Najvažniji rubni uvjet je zadan na *inlet*-u odnosno na ulazu u domenu. Zadana je ulazna brzina od  $6 \text{ m s}^{-1}$  s intenzitetom turbulencije od 5% i omjerom viskoznosti 10. Tlak na *outlet*-u odnosno kraju domene postavljen je na nulu. Aeroprofil je postavljen na type: wall, dok su zidovi domene također postavljeni na type: wall no u postavkama postavljamo da nemaju trenje iz razloga što na zidovima neće brzina biti nula nego će imati odgovarajuću vrijednost.

Sljedeći korak je definiranje referentnih vrijednosti te iz njih dobivamo koeficijente uzgona i otpora. Referente vrijednosti koje je potrebno promijeniti su duljina i površina. Duljina lopatice iznosi 83 mm, dok je površina umnožak duljine lopatice i dužine tetive aeroprofila te iznosi  $0.083 \text{ m}^2$ . Koeficijenti uzgona i otpora računaju se prema sljedećim izrazima:

$$\text{Koeficijent uzgona : } C_L = \frac{2L}{\rho A V^2} \quad (5.1)$$

$$\text{Koeficijent otpora: } C_D = \frac{2D}{\rho A V^2} \quad (5.2)$$

Gdje je:

$L$  sila uzgona [F],

$D$  sila otpora [F],

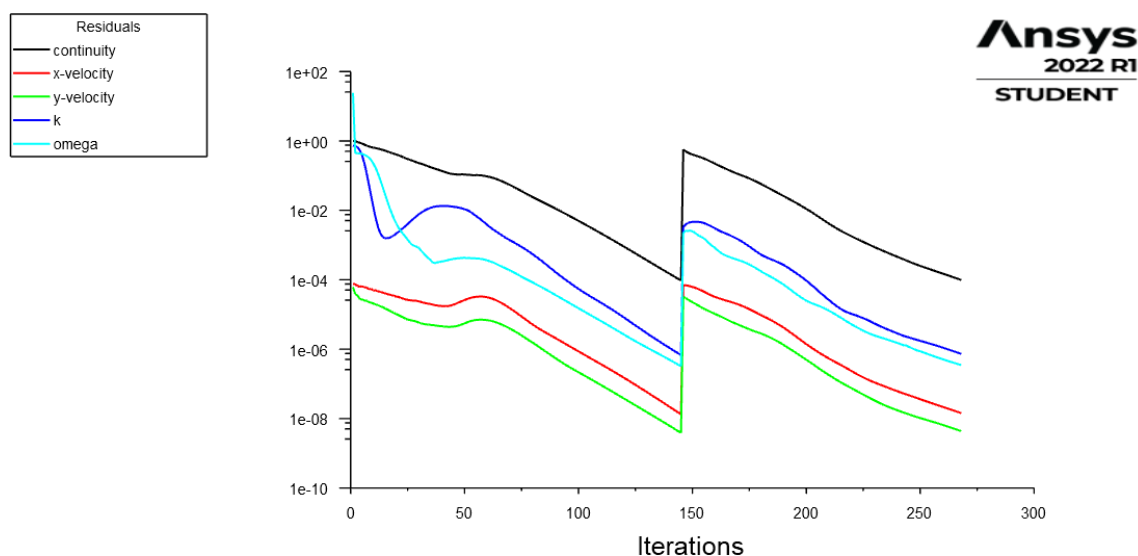
$\rho$  gustoća fluida [ $\text{kg/m}^3$ ],

$A$  površina [ $\text{m}^2$ ],

$V$  brzina strujanja fluida [m/s].

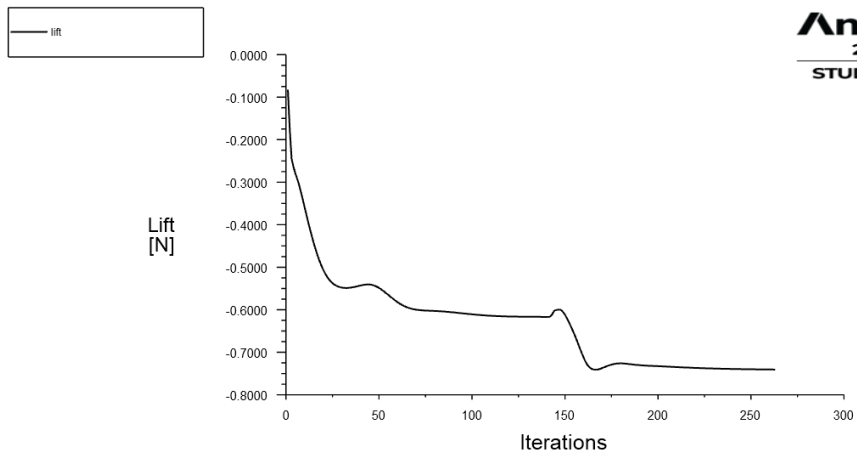
Fluent nam omogućuje korištenje više različitih rješavača stacionarnog strujanja, a za ovu simulaciju koristiti ćemo Coupled metodu. Coupled zahtijeva više radne memorije te je vrijeme

izvođenja dulje no potreban mu je manji broj iteracija za postizanje rješenja u odnosu na druge rješavače. Potrebno je postaviti reziduale koji služe kao uvjeti konvergencije, oni predstavljaju razliku između očekivanih rješenja i dobivenih rješenja. Postavke reziduala postavljene su na vrijednost od 0,0001. Za simulaciju pokrećemo standardnu inicijalizaciju rješenja iz *inlet-a*, te provodimo proračun za 1000 iteracija ili do konvergencije rješenja te zatim opciju momentum podižemo s First Order upwind na Second Order Upwind te ponovno pokrećemo proračun za 1000 iteracija ili do konvergencije.

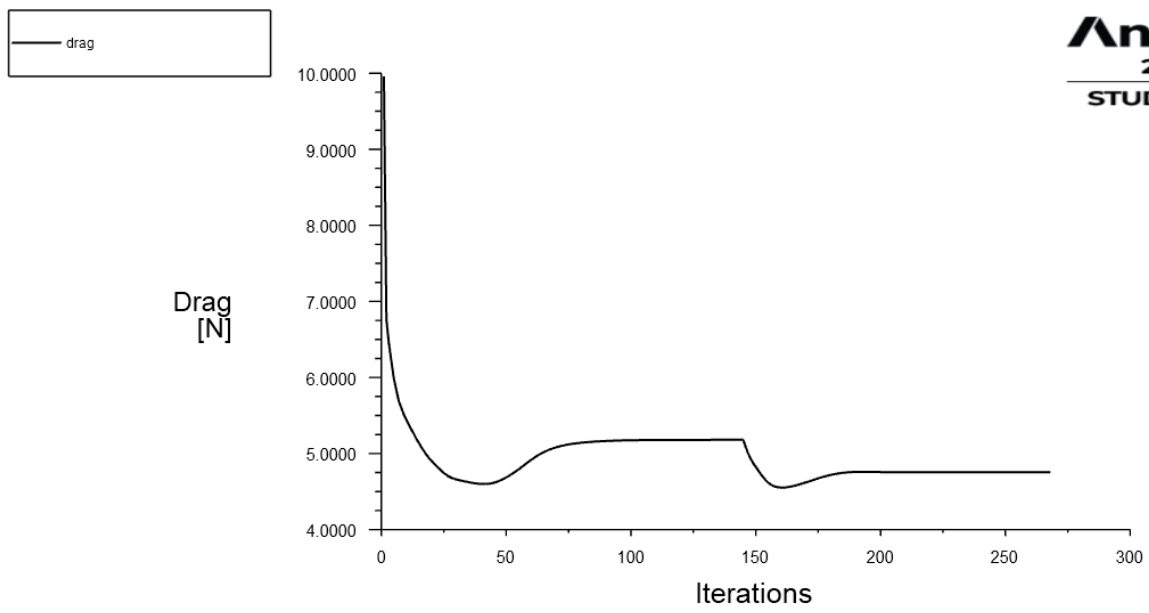


*Slika 5.5. Primjer grafa konvergencije*

Pri pokretanju simulacije postavljeno je da program izračunava koeficijente uzgona koje ćemo usporediti u sljedećem poglavlju za tri aeroprofila od  $0^\circ$  do  $180^\circ$  s korakom od  $20^\circ$ .



*Slika 5.6. Primjer konvergencije sile uzgona*



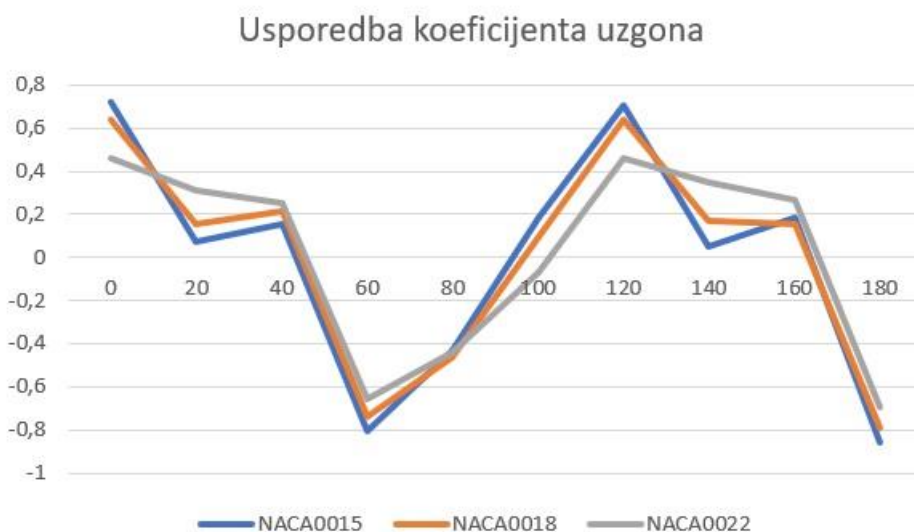
*Slika 5.7. Primjer konvergencije sile otpora*

## 6. REZULTATI

Nakon provedenih simulacija, dobiveni su sljedeći rezultati koeficijenta uzgona za brzinu vjetra od 6m/s :

Tablica 6.1. Rezultati za koeficijent uzgona

|      | NACA0015 | NACA0018 | NACA0022 |
|------|----------|----------|----------|
| 0°   | 0,721    | 0,638    | 0,461    |
| 20°  | 0,076    | 0,155    | 0,313    |
| 40°  | 0,156    | 0,212    | 0,252    |
| 60°  | -0,807   | -0,736   | -0,656   |
| 80°  | -0,433   | -0,466   | -0,444   |
| 100° | 0,187    | 0,097    | -0,072   |
| 120° | 0,708    | 0,636    | 0,461    |
| 140° | 0,053    | 0,166    | 0,348    |
| 160° | 0,183    | 0,153    | 0,268    |
| 180° | -0,859   | -0,791   | -0,692   |



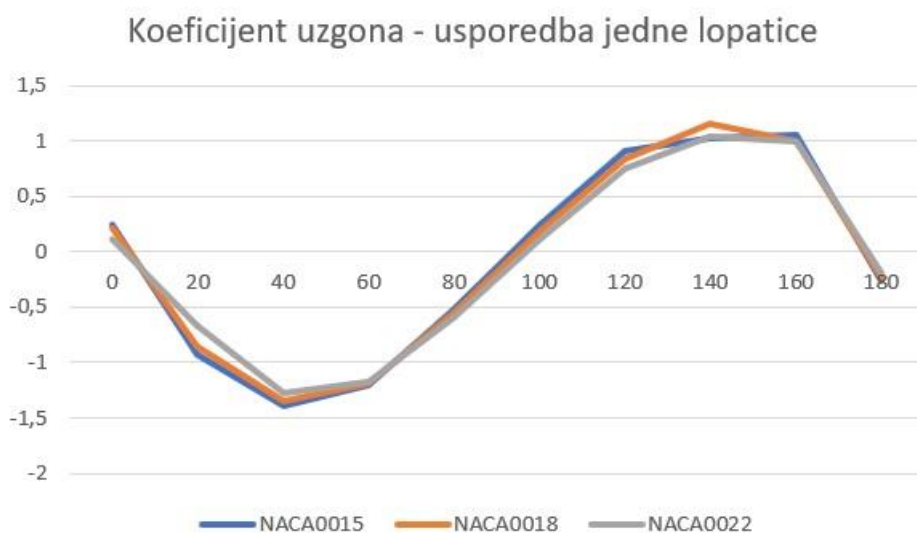
Slika 6.1. Usporedba rezultata za koeficijent uzgona

Koeficijent uzgona postiže najvišu pozitivnu vrijednost pri kutu od 0° i 120°. Pri kutu od 45° mijenja predznak, odnosno sila uzgona počinje djelovati u suprotnom smjeru. Pri kutu od 90° ponovno ulazi u pozitivne vrijednosti, da bi pri kutu od 165° ponovno počeo djelovati u suprotnom smjeru. Najmanju negativnu vrijednost koeficijent uzgona poprima pri kutovima od 60° i 180°.

Uspoređeni su i rezultati koeficijenta uzgona ako bi gledali vrijednosti samo za jednu lopaticu, te su dobiveni sljedeći rezultati:

Tablica 6.2. Usporedba rezultata koeficijenta uzgona za jednu lopaticu

|             | <b>NACA0015</b> | <b>NACA0018</b> | <b>NACA0022</b> |
|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| <b>0°</b>   | 0,242           | 0,218           | 0,116           |
| <b>20°</b>  | -0,921          | -0,862          | -0,674          |
| <b>40°</b>  | -1,396          | -1,348          | -1,275          |
| <b>60°</b>  | -1,204          | -1,19           | -1,178          |
| <b>80°</b>  | -0,528          | -0,552          | -0,593          |
| <b>100°</b> | 0,239           | 0,185           | 0,12            |
| <b>120°</b> | 0,912           | 0,843           | 0,75            |
| <b>140°</b> | 1,028           | 1,15            | 1,048           |
| <b>160°</b> | 1,056           | 1,005           | 0,996           |
| <b>180°</b> | -0,259          | -0,231          | -0,194          |



Slika 6.2. Usporedba rezultata koeficijenta uzgona za jednu lopaticu

Koeficijent uzgona poprima najveću pozitivnu vrijednost pri kutovima od 140° i 160°. Pri kutu od 10° mijenja predznak te sila uzgona djeluje u suprotnom smjeru. Pri kutu od 90° ponovno se sila uzgona vraća u pozitivan predznak da bi pri kutu od 175° ponovno promijenila predznak te poprimila negativnu vrijednost. Sila uzgona poprima najmanju negativnu vrijednost pri kutovima od 40° i 60°.

Uspoređeni su i koeficijenti snage za različite omjere brzine vjetra. Kroz formulu (3.2) za omjer brzine vjetra za odabran  $\lambda$  dobivene su kutne brzine rotora, koje su prikazane u sljedećoj tablici:

*Tablica 6.3. Odabrane vrijednosti kutne brzine*

| $\lambda$ | $\omega$ [rad/s] |
|-----------|------------------|
| 0,4       | 6,4              |
| 0,6       | 9,6              |
| 0,8       | 12,8             |
| 1         | 16               |

Provedenu su simulacije za navedene kutne brzine rotora te su dobiveni sljedeći rezultati momenta  $T$ .

*Tablica 6.4. Dobivene vrijednosti momenta  $T$  [Nm]*

| $\omega$ [rad/s] | <b>NACA0015</b> | <b>NACA0018</b> | <b>NACA0022</b> |
|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 6.4              | 0,0006          | 0,006           | 0,0087          |
| 9.6              | 0,043           | 0,045           | 0,058           |
| 12.8             | 0,087           | 0,09            | 0,12            |
| 16               | 0,151           | 0,175           | 0,215           |

Koeficijent snage ( $C_p$ ) sada možemo izračunati prema formuli (6.1.):

$$C_p = \frac{T \cdot \omega}{0.5 \cdot \rho \cdot A \cdot u^3} \quad (6.1)$$

gdje je:

$T$  moment [Nm],

$\omega$  kutna brzina rotora [rad/s]

$\rho$  gustoća [ $\text{kg/m}^3$ ]

$A$  površina [ $\text{m}^2$ ]

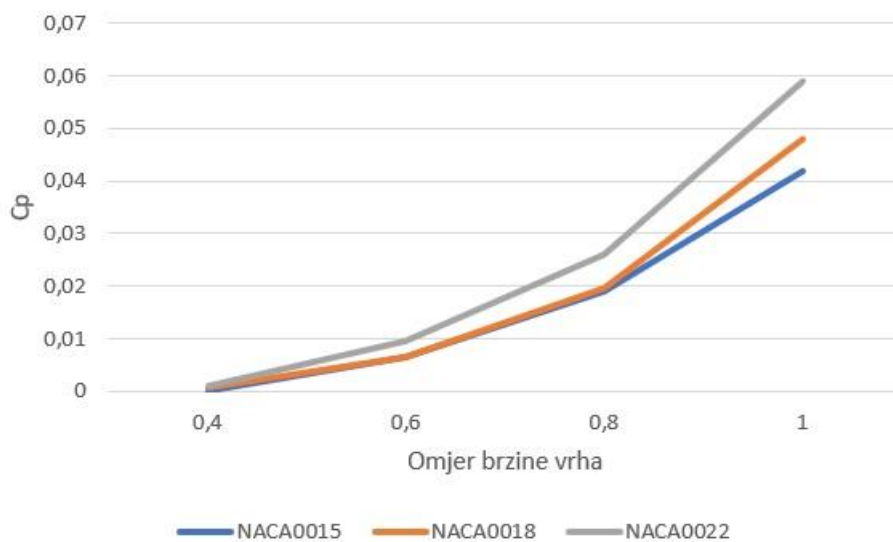
$u$  brzina vjetra [ $\text{m}^3$ ]

Vrijednosti momenata koji su dobiveni simulacijom uz pripadajuću kutnu brzinu rotora uvršteni su u jednadžbu (6.1) te dobiveni su sljedeći rezultati koeficijenta snage:

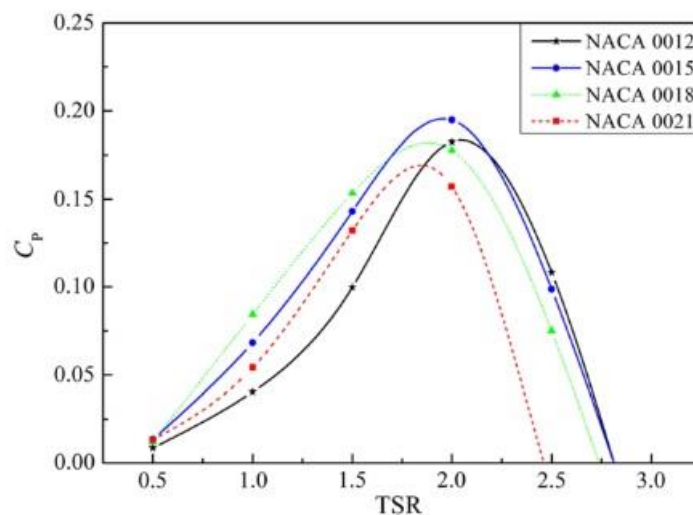


Tablica 6.5. Dobivene vrijednosti koeficijenta snage

| $\lambda$ | NACA0015 | NACA0018 | NACA0022 |
|-----------|----------|----------|----------|
| 0,4       | 0,000065 | 0,00065  | 0,00095  |
| 0,6       | 0,0065   | 0,00739  | 0,0095   |
| 0,8       | 0,019    | 0,0197   | 0,026    |
| 1         | 0,042    | 0,0479   | 0,059    |



Slika 6.3 Usporedba koeficijenta snage



Slika 6.4. Rezultati usporedbe koeficijenta snage iz prijašnjih istraživanja [19]

Iz slike (6.3) je vidljivo da otpočetak NACA0022 ima bolje rezultate, odnosno veći koeficijent snage. Debljina aeroprofila pozitivno utječe na vrijednost koeficijenta snage.

Za promatrani raspon rezultati su usporedivi sa rezultatima iz literature [19], a odstupanja se mogu direktno povezati s pojednostavljenjima, relativno rijetkom računalnom mrežom te korištenim numeričkim shemama.

## 7. ZAKLJUČAK

U ovom završnom radu izvršena je analiza strujanja vjetra brzine 6m/s kroz Darrieusovu vertikalnu vjetroturbinu za 3 različita oblika lopatica vjetroturbine. Iako se s povećanjem debljine aeroprofila povećava i otpor općenito deblji profili omogućuju rad u širem rasponu brzina. Što se tiče koeficijenta uzgona, sva tri aeroprofila su imala slične rezultate. Poznato je da Darrieusova vjetroturbina ima problema kod samopokretanja te su deblji aeroprofil pokazali bolje karakteristike kod samopokretanja od tanjih. Osim toga deblji aeroprofil stvaraju manje buke te imaju veću čvrstoću pri savijanju. Debljina aeroprofila ne može se povećavati u beskonačnost iz razloga što će se stvoriti veći otpor koji će otežati pokretanje. Stoga su prijašnja istraživanja pokazala da optimalna debljina aeroprofila iznosi 18-22%. U kontekstu znanstvenih postignuća na ovom polju, možemo ustvrditi da su rezultati usporedivi s rezultatima u literaturi, a odstupanja se primarno mogu pripisati numerici te potencijalno neadekvatnoj numeričkoj mreži.

Što se tiče CFD-a, veoma je zahvalan pristup iz razloga što su problemi dinamike fluida izrazito složeni i nepredvidljivi, a danas je računalno modeliranje jedini način da se dobije uvid u pojave unutar fluida u gibanju. Cilj CFD-a je stvoriti dovoljno točan model zadanog problema, te provođenje dovoljno točne simulacije kako bi se dobio zadovoljavajući uvid. Veoma je dobra alternativa u situacijama gdje su izrada prototipa ili eksperimentalni pristup preskupi ili jednostavno nemogući.

Darrieusova vertikalna vjetroturbina je veoma dobra alternativa u odnosu na velika postrojenja iz ekonomskih razloga te im je potreban puno manji prostor za konstrukciju i rad. Sve više se koriste u urbanim područjima zbog svog jednostavnog održavanja te stvaranja manje buke u odnosu na druge vjetroturbine. Iako je Darrieusova vjetroturbina trenutno još u fazi razvoja, sve više kućanstva počinje koristiti ovu vjetroturbinu za hlađenje i grijanje vode te za proizvodnju električne energije.

## 8. LITERATURA

- [1] Wolf, I.: kolegij „Obnovljivi izvori energije“, predavanje „Energija vjetra“, 2021
- [2] S Interneta, <https://slidetodoc.com/tlak-zraka-vjetar-i-zrane-mase-tlak-zraka/>, 2020
- [3] S Interneta, <https://www.irena.org/wind>, Srpanj 2019
- [4] S Interneta, <https://www.renovablesverdes.com/hr/turbina-eolica/>, Rujan 2021
- [5] S Interneta, [https://hr.wikipedia.org/wiki/Dijelovi\\_vjetroagregata](https://hr.wikipedia.org/wiki/Dijelovi_vjetroagregata), Siječanj 2022
- [6] Petrone, C.; Numerical Simulation of the Influence of Platform Pitch Motion on Power Generation Steadiness in Floating Offshore Wind Turbines“, s Interneta, [https://www.researchgate.net/figure/Lift-and-drag-force-of-wind-turbine-airfoil\\_fig1\\_322072213](https://www.researchgate.net/figure/Lift-and-drag-force-of-wind-turbine-airfoil_fig1_322072213), Srpanj 2017
- [7] Hyams, M.A.: „Metropolitan Sustainability“, s Interneta <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/horizontal-axis-wind-turbine>, 2017
- [8] S interneta, <https://www.conserve-energy-future.com/comparison-of-horizontal-and-vertical-axis-wind-turbines.php>, Srpanj 2020
- [9] Eriksson, S.: "Direct Driven Generators for Vertical Axis Wind Turbines", <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:172415/FULLTEXT01.pdf>, 2008
- [10] Hasanović, D.: „Konstrukcija Darrieusove vjetroturbine“, s Interneta, <https://repositorij.vuka.hr/islandora/object/vuka%3A2140/datastream/PDF/view>, Svibanj 2022
- [11] S Interneta, <https://www.wikiwand.com/hr/Vjetroturbine>, 2016
- [12] S Interneta, [https://en.wikipedia.org/wiki/Computational\\_fluid\\_dynamics](https://en.wikipedia.org/wiki/Computational_fluid_dynamics), kolovoz, 2020.
- [13] Abbott, M; Basco, D.: Computational Fluid Dynamics An Introduction for Engineers, John Wiley, New York, 1989.
- [14] Čarija, Z.: „Numeričko projektiranje hidrauličkih strojeva“, Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, Rijeka 2010.
- [15] Kranjčević, L.: „Mehanika fluida“, Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, Rijeka 2008
- [16] S interneta, <https://engineerexcel.com/advantages-of-turbulent-flow>
- [17] Piggott, M.D.: „Assessment of spurious mixing in adaptive mesh simulations of the two-dimensional lock-exchange“, S interneta, [https://www.researchgate.net/figure/Example-of-a-structured-triangular-mesh-and-an-unstructured-triangular-mesh-in-a-unit-box\\_fig3\\_259159803](https://www.researchgate.net/figure/Example-of-a-structured-triangular-mesh-and-an-unstructured-triangular-mesh-in-a-unit-box_fig3_259159803), Siječanj 2014
- [18] S interneta, <http://airfoiltools.com/airfoil/naca4digit>

- [19] Song, C.; „Study on Aerodynamic Characteristics of Darrieus Vertical Axis Wind Turbines with Diferent Airfoil Maximum Thicknesses Through Computational Fluid Dynamics“, Rujan 2019

## 9. POPIS SLIKA

|   |    |
|---|----|
| Slika 2.1. Smjer globalnog vjetra[2].....   | 2  |
| Slika 2.2. Razvoj snage i dimenzija vjetroagregata[1].....                              | 3  |
| Slika 2.3. Prikaz porasta ukupne snage vjetroelektrana[3].....                          | 4  |
| Slika 3.1. Dijelovi vjetroagregata [5].....   | 6  |
| Slika 3.2. Prikaz sila koje djeluju na profil lopatica [6].....                         | 8  |
| Slika 3.3. Koeficijent iskoristivosti vjetroturbina [1].....                            | 9  |
| Slika 3.4. Primjer vjetroturbine s vodoravnom osi [8].....                              | 10 |
| Slika 3.5. Savonisuov, Darrieusov i H rotor[9].....                                     | 11 |
| Slika 3.6. Savoniusova vjetroturbina s dvije lopatice[11].....                          | 13 |
| Slika 3.7. Darrieusov H-rotor[10].....  | 14 |
| Slika 3.8. Darrieusova vjetroturbina s spiralnim lopaticama[10].....                    | 15 |
| Slika 3.9. Darrieusova vjetroturbina s J-lopaticama[10].....                            | 16 |
| Slika 3.10. Hibridna Savonius-Darrieus vjetroturbina[10].....                           | 17 |
| Slika 4.1. Laminarno i turbulentno strujanje[16].....                                   | 20 |
| Slika 4.2. Energetski spektar turbulentnog strujanja[14].....                           | 22 |
| Slika 4.3. Primjer strukturirane i nestrukturirane mreže[17] .....                      | 23 |
| Slika 5.1. Dimenzije računске domene.....   | 25 |
| Slika 5.2. Numerička mreža koja se koristi u CFD simulaciji.....                        | 25 |
| Slika 5.3. Inflacija oko lopatice aeroprofila.....                                      | 26 |
| Slika 5.4. Rubni uvjeti.....  | 26 |
| Slika 5.5. Primjer grafa konvergencije.....   | 28 |
| Slika 5.6. Primjer konvergencije sile uzgona.....                                       | 29 |
| Slika 5.7. Primjer konvergencije sile otpora.....                                       | 29 |
| Slika 6.1. Usporedba rezultata za koeficijent uzgona.....                               | 30 |
| Slika 6.2. Usporedba rezultata koeficijenta uzgona za jednu lopaticu.....               | 31 |
| Slika 6.3. Usporedba koeficijenta snage.....  | 33 |
| Slika 6.4. Rezultati usporedbe koeficijenata snage iz prijašnjih istraživanja [19]..... | 33 |

## 10. POPIS TABLICA

|   |    |
|---|----|
| Tablica 5.1. Konfiguracija vjetroturbine.....                               | 24 |
| Tablica 6.1. Rezultati za koeficijent uzgona.....                           | 30 |
| Tablica 6.2. Usporedba rezultata koeficijenta uzgona za jednu lopaticu..... | 31 |
| Tablica 6.3. Odabrane vrijednosti kutne brzine.....                         | 32 |
| Tablica 6.4. Dobivene vrijednosti momenta T.....                            | 32 |
| Tablica 6.5. Dobivene vrijednosti koeficijenta snage.....                   | 33 |

## 11. SAŽETAK

Izvršena je 2D analiza strujanja vjetra brzine 6 m/s kroz Darrieusovu vjetroturbinu pomoću CFD programa *Ansys Fluent*. Uspoređene su vrijednosti koeficijenta lifta i koeficijenta snage za NACA0015, NACA0018 i NACA0022 aeroprofile. Izrađene su geometrije, mreže i provedena simulacija. Rezultati su uspoređeni s rezultatima iz literature te pokazuju za analizirani raspon zadovoljavajuću podudarnost.

Ključne riječi: Darrieusova vjetroturbina, računalna dinamika fluida, *Ansys Fluent*, aeroprofile, koeficijent snage, koeficijent uzgona

### SUMMARY

A 2D analysis of 6 m/s wind flow through the Darrieus wind turbine was performed using the Ansys Fluent CFD program. Lift coefficient and power coefficient for NACA0015, NACA0018 and NACA0022 airfoils were compared. Geometries, meshes and simulations were created. The results were compared with the results from the literature and a show a satisfactory agreement for the analyzed range.

Key words: Darrieus wind turbine, computational fluid dynamics , Ansys Fluent, airfoils, lift coefficient, power coefficient