Proračun snage vjetro-turbine

Išek, Ivan

Master's thesis / Diplomski rad

2015

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:426117

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Ivan Išek

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Mario Šavar

Student:

Ivan Išek

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodostrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Ivan Išek** Mat. br.: 0035179194

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Proračun snage vjetro - turbine**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Wind turbine power calculation**

Opis zadatka:
Povećanom potrebom za energijom, a posebno zelenom energijom, vjetro - turbine su se pokazale kao novi trend u energetici. Do sada nezanimljive zbog relativno skromnih snaga, sada su vrlo zanimljive zbog svoje isplativosti i vrlo čiste energije.
U završnom radu potrebno je provesti proračun rotora vjetro - turbine za definiranu geometriju radnog kola. Potrebno je provesti računalnu simulaciju opstrujavanja te izračunati raspored tlaka na lopatici. U računalnoj simulaciji je potrebno primijeniti model trodimenzijskog viskoznog turbulentnog strujanja nestlačivog fluida oko aeroprofila. Utjecaj površine zemlje i stupa na strujanje zanemarite.

Rad treba sadržavati:
1. Opis rada vjetro-turbine.
2. Definiciju geometrije lopatice rotora.
4. Izračun rasporeda tlaka na lopatici primjenom računalnog programa.
5. Usporedbu rezultata s rezultatima dvodimenzionalnog strujanja s nizom parcijalnih strojeva.
6. Diskusiju rezultata i zaključke.

Rezultate proračuna prikazati odgovarajućim tablicama, dijagramima i slikama.
U radu treba navesti literaturu i eventualno dobivenu pomoć tijekom izrade.

Zadatak zadan:	Rok predaje rada:	Predviđeni datumi obrane
24. rujna 2015.	26. studenog 2015.	2, 3 i 4 prosinca 2015.

Zadatak zadao: Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sci. Mario Šavar Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

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

Ovom prilikom zahvalio bih se voditelju rada prof. dr. sc. Mariu Šavaru te asistentu Severinu Krizmaniću, doc. dr. sc., na ukazanim savjetima i pomoći pri izradi ovog rada.

Diplomski rad napravljen je u okviru RCOP projekta "Centre of Excellence for Structural Health" (CEEStructHealth) sufinanciranog iz sredstava Europske unije (ugovor IPA2007/HR/16IPO/001-040513).

Ivan Išek

Sadržaj:

Sadržaj: I
Popis slika: III
Popis tablica: V
Popis oznaka: VI
Sažetak: 1
1. Uvod 2
2. Opis rada vjetro-agregata 3
2.1. Dijelovi vjetro-agregata 3
2.2. Opis rada vjetro-agregata 5
2.3. Iskoristivost 5
3. Opis modela strujanja 8
3.1. Osnovne jednadžbe dinamike fluida 8
3.1.1. Jednadžba kontinuiteta 8
3.1.2. Jednadžba količine gibanja 8
3.1.3. Jednadžba momenta količine gibanja 9
3.1.4. Zakon očuvanja energije 9
3.2. Turbulencija 9
3.2.1. K-epsilon (k-ε) model turbulencije 11
3.2.2. K-omega (k-ω) model turbulencije 12
3.3. Frame motion 14
4. Definicija geometrije lopatice rotora 16
4.1. Definiranje aeroprofila 17
4.2. Definiranje napadnog kuta i sila 19
4.3. Osnovni podaci o vjetroagregatu 23
5. Modeliranje i diskretizacija 25
5.1. Diskretizacija 25
5.2. Primjenjeni modeli i postavke simulacije 30
6. Raspored tlaka i brzina 32
7. Proračun snage 49
7.1. Proračun sila, momenata i snage 49

7.2. Usporedba sa 2D rezultatima 50
8. Diskusija i zaključak 51
9. Literatura 53

Popis slika:

Slika 1. Dijelovi vjetro-agregata 4
Slika 2. Turbulentno strujanje uz ploču 10
Slika 3. Promjena duljine chorda aeroprofila duž lopatice 16
Slika 4. Promjena twista kuta duž lopatice 17
Slika 5. Prikaz osi na lopatici 17
Slika 6. Aeroprofili 18
Slika 7. Dimenzije aeroprofila 19
Slika 8. Promjena napadnog kuta i relativne brine vjetra 19
Slika 9. Definicija napadnog kuta 20
Slika 10. Koordinatni sustavi 21
Slika 11. Trokuti brzina i sila 21
Slika 12. Osnovne dimenzije 23
Slika 13. Dimenzije glavčine 24
Slika 14. Pitch control 24
Slika 15. Dimenzije domene 25
Slika 16. Podjela domene 26
Slika 17. Granični sloj 27
Slika 18. Wireframe mreže 28
Slika 19. Mreža sa rubnim uvjetima 29
Slika 20. Puni oblik domene sa periodic rubnim uvjetom 30
Slika 21. Raspodjela tlaka po obodu lopatice 32
Slika 22. Raspodjela tlaka po obodu lopatice 33
Slika 23. Raspodjela tlaka u presjeku profila DU40 34
Slika 24. Raspodjela tlaka u presjeku profila DU35 34
Slika 25. Raspodjela tlaka u presjeku profila DU30 35
Slika 26. Raspodjela tlaka u presjeku profila DU25 35
Slika 27. Raspodjela tlaka u presjeku profila DU21 36
Slika 28. Raspodjela tlaka u presjeku profila NA64618 36
Slika 29. Raspodjela brzina u presjeku profila DU40 37
Slika 30. Raspodjela brzina u presjeku profila DU35 38
Slika 31. Raspodjela brzina u presjeku profila DU30 38

Slika 32. Raspodjela brzina u presjeku profila DU25 39
Slika 33. Raspodjela brzina u presjeku profila DU21 39
Slika 34. Raspodjela brzina u presjeku profila NA64618 40
Slika 35. Raspodjela brzina u presjeku zy duž lopatice 41
Slika 36. Raspodjela tlaka u presjeku zy duž lopatice 42
Slika 37. Raspodjela brzina u presjeku xz duž lopatice 43
Slika 38. Raspodjela tlaka u presjeku xz duž lopatice 44
Slika 39. Raspodjela strujnica oko profila DU40 45
Slika 40. Raspodjela strujnica oko profila DU30 45
Slika 41. Raspodjela brzina na ulazu u domenu 46
Slika 42. Raspored posmičnih naprezanja po obodu lopatice 47
Slika 43. Raspored posmičnih naprezanja po obodu lopatice 47
Slika 44. Nejednolika raspodjela elemenata duž lopatice 51
Slika 45. Opis geometrije lopatice konačnim volumenima 52

Popis tablica:

Tablica 1. Položaji i geometrija profila 18
Tablica 2. Udaljenost profila od korjena lopatice 33
Tablica 3. Iznosi komponenata sila koje djeluju na lopaticu 49
Tablica 4. Iznosi komponenata momenata koji djeluju na lopaticu 49
Tablica 5. Ukupne sile i momenti na rotor 49

Popis oznaka:

A	N	ukupna sila na lopaticu,
a	m/s^2	akceleracija,
C_L	-	koeficijent ugona,
C_D	-	koeficijent otpora,
C_p	-	koeficijent tlaka,
C_p	-	stupanj aerodinamičke pretvorbe,
c	m	duljina chorda, tetive,
D_ω	$J/(m^3s)$	poprečna difuzija
d	m	duljina pitch osi od korjena lopatice,
E_k	J	kinetička energija,
F	N	ukupna sila na aeroprofil,
F_D	N	sila otpora,
F_L	N	sila uzgona,
F_u	N	sila na profil u smjeru kutne brzine,
G_k	$J/(m^3s)$	produkcija turbulentne kinetičke energije,
G_ω	$J/(m^3s)$	produkcija brzine specifične disipacije kinetičke enrgije,
k	J/kg	kinetička energija turbulencije,
M	Nm	moment,
P	W	snaga,
p	Pa	tlak,
r	m	udaljenost na lopatici od osi rotora,
Re	-	Reynoldsov broj,
V_{rel}	m/s	relativna brzina vjetra na profil,
V_{vjetra}	m/s	brzina vjera,
Y_k	$J/(m^3s)$	produkcija turbulentne kinetičke energije,

Y_ω	J/(m^{3}s)	produkcija brzine specifične disipacije kinetičke energije,
v	m/s	srednja brzina,
v_1	m/s	brzina ispred lopatice,
v_2	m/s	brzina iza lopatice,
v_r	m/s	relativna brzina,
u	m/s	kutna brzina,
α	deg	napadni kut,
β	deg	kut izmedu brzine vjetra i relativne brzine vjetra,
Γ_k	J/(m^{3}s)	efektivna difuzivnost turbulentne kinetičke energije,
Γ_ω	J/(m^{3}s)	efektivna difuzivnost brzine disipacije turbulentne kinetičke energije,
γ	deg	kut između ukupne sile na lopaticu i sile otpora,
ε	J/kgs	disipacija kinetičke energije,
μ	Pas	dinamička viskoznost,
ν	m/s^2	kinematička viskoznost,
ρ	kg/m^3	gustoća,
ω	s^{-1}	obodna brzina,
ϕ	deg	ukupni kut profila,
ϑ_{twist}	deg	twist kut profila,
ϑ_{pitch}	deg	pitch kut lopatice,
Ω	1/s^2	kutno ubrzanje.

Sažetak:

Tema diplomskog rada je proračun snage vjetro-agregata. Nakon sažetog opisa rada vjetro-agregata opisani su primjenjeni modeli strujanja. Model koji je korišten je trodimenzijsko, viskozno, turbulentrno strujanje neslačivog fluida. Proračun rotora je napravljen CFD simulacijom u programskom paketu Ansys Workbench.

Model lopatice vjetroagregata je konstruiran u Solidworksu. Cijeli proračun je napravljen za jedan pitch kut lopatice koji iznosi $51^o84'$. Pri ovom pitch napadni kut na referentni profil bio približno 0^o u 2D CFD simulaciji u završnom radu. Model je napravljen za jednu trećinu rotora uz korištenje periodičnog (periodic) rubnog uvjeta.

Mesh, CFD i postprocesiranje su napravljeni u Ansys Workbenchu. Za mesh su korišteni elementi tetraedra i heksaedra. Tetraedri su korišteni za diskretizaciju domene oko lopatice, dok su heksaedri korišteni za sweep funkcije.

CFD je proveden u Fluentu. Provedena simulacija je 3D, transijentna, viskozna i turbulentna. Korišteni model turbulencije je k-ω SST. Brzina vjetra je konstantna kao i brzina vrtnje rotora. Kao model rotacije rotora je korišten frame motion model implementiran u Fluent.

Postprocesiranje je obavljeno u Fluentu, Tecplotu i Workbenchu. Prikazani su polja tlaka i brzina te izračun momenta i snage kojeg stvara lopatica. Konačni rezultati su uspoređeni sa rezultatima 2D analize.

1. Uvod

Povećanom potrebom za energijom, a posebno zelenom energijom, vjetro-elektrane su se pokazale kao novi trend u energetici. Do sada nezanimljive zbog relativno skromnih snaga, sada su vrlo zanimljive zbog svoje isplativosti i vrlo čiste energije.

Prvi poznati uređaji pokretani vjetrom napravljeni su s namjenom za mljevenje pšenice i pumpanje vode, a najstariji poznati uređaji pojavili su se u Perziji u doba oko 200 godina prije Krista. Prve vjetrenjače pojavljuju se u Zapadnoj Europi u 14. stoljeću i za razliku od perzijskih vjetrenjača koristile su dizajn sa horizontalnom osi vrtnje. Sve do kraja 19. stoljeća vjetrenjače se koriste za pumpanje vode i za pokretanje mlinova. Prvi vjetroagregat s namjenom proizvodnje električne energije izradio je Charles F. Brush u američkom gradu Clevelandu u Ohiu. Ta vjetrenjača imala je promjer od 17 metara i 144 lopatice od cedrovog drveta. Tek 1891. godine je Dane Poul L Cour razvio prvi vjetroagregat koji je korstio načela aerodinamičkog dizajna. Prethodnik suvremenih vjetroturbina sa horizontalnom osi vrtnje pušten je u pogon 1931. godine u Jalti, na području bivšeg SSSR-a. Bio je to generator snage 100 kW.

Tjekom sedamdesetih, a posebno osamdesetih godina prošlog stoljeća vjetroagregati prešli su s kućne i agrikulturalne upotrebe na masovniju upotrebu u elektranama snage od 50 do 600kW. Do ranih devedesetih većina vjetroelektranskih instalacija se odnosila na Kaliforniju gdje gradnja vjektroagregata doživljava procvat. U Europi i Aziji trend korištenja vjetroagregata rastao je polaganije kroz osamdesete i rane devedesete. Veća cijena električne energije i izvrsni resursi vjetra stvorili su malo ali stabilno tržište u Sjevernoj Europi. Nakon 1990. godine tržište se većinom premjestilo na Europu i Aziju gdje je instalirano više tisuća megavata snage iz vjetroelektrana.

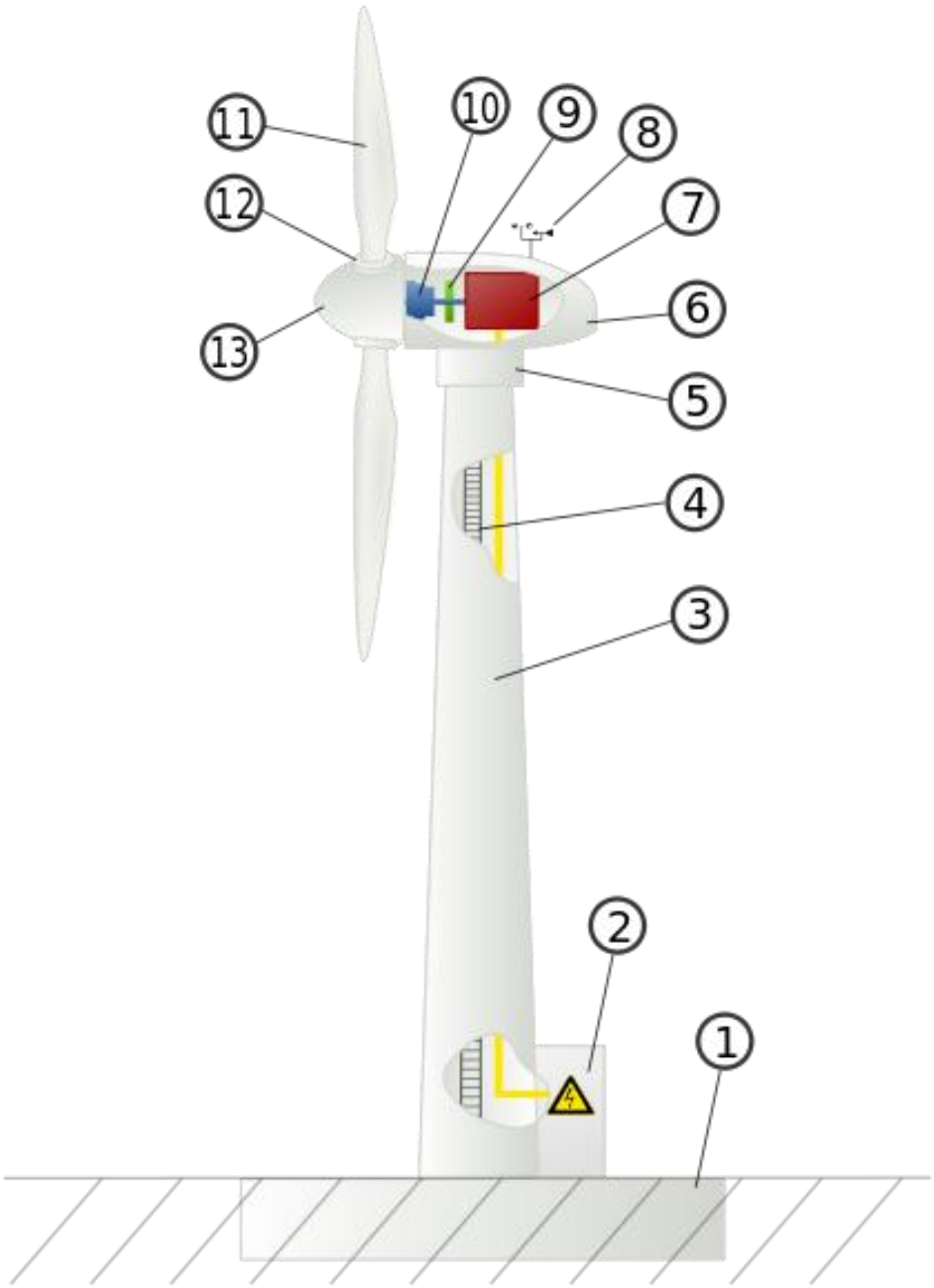
2. Opis rada vjetro-agregata

2.1. Dijelovi vjetro-agregata

Postoji mnogo različith izvedbi i podjela vjetro-agregata sa različitim dijelovima. Osnovna podjela je na one sa horizontalnom i vertikalnom osi vrtnje, a osnovna razlika da li je os vrtnje vertikalna i prolazi kroz os stupa ili je horizontalna odnosno okomita na stup. U nastavku su nabrojani dijelovi vjetro-agregata sa horizontalnom osi vrtnje kakav je i proračunat u okviru ovog diplomskog rada.

Osnovni djelovi vjetro-agregata prikazani slikom 1 su:

1. Temelj
2. Priključak na elektroenergetski sustav
3. Stup
4. Ljestve za pristup
5. Zakretnik
6. Kućište stroja ili gondola
7. Električni generator
8. Anemometar
9. Kočioni sustav
10. Prijenosnik snage
11. Lopatice rotora
12. Sustav zakretanja lopatica
13. Glavčina rotora



Slika 1. Dijelovi vjetro-agregata

2.2. Opis rada vjetro-agregata

Osnovna zadaća vjetro-agregata je pretvorba kinetičke energije vjetra u električnu energiju. Sve započinje nastrujavanjem vjetra na lopatice koje su aerodinamički oblikovane kako bi se nastrujavanjem vjetra na njih stvorio uzgon koji ih pokreće. Najčešće se koriste 3 lopatice jer je to najisplativija i najpraktičnija izvedba. Iskoristivost vjetro-agregata najviše ovisi o obliku lopatica jer one preuzimaju kinetiču energiju vjetra na sebe i predaju ju dalje na rotor. Lopatice su spojene na glavčinu koja je preko kočionog ustava i prijenosnika snage spojena na rotor. Lopatice se mogu zakretati unutar spoja sa glavčinom oko svoje pitch osi kako bi se mogli mijenjati napadni kutovi vjetra na lopaticu i time osigurala vrtnja generatora pri konstantnim brzinama, odnosno kako bi se mogao sustav isključiti iz pogona ukolika brzina vjetra bude prevelika kako nebi došlo do oštećenja.

Prijenosnik snage nemaju svi agregati, a kad ga imaju to su uglavnom multiplikatori. Uloga prijenosnika snage je prilagođavanje niže brzine vrtnje rotora vjetroturbine višoj brzini vrtnje rotora električnog generatora. Hlađenje prijenosnika se najčešće vrši zrakom, a podmazivanje sintetičkim uljem.

Gondola je kućište u koje su smješteni vratilo, prijenosnik snage i generator. Uloga gondole je zaštita djelova od vanjskih utjecaja te smanjenje buke. Gondola se nalazi na stupu koji može biti izveden kao cjevasto konični, teleskopski, rešetkasti, učvršćeni i povezani. Danas se najviše koristi cjevasta konstrukcija koju osim čvrstoće odlikuje i otpornost na vibracije.

2.3. Iskoristivost

O stupnju iskoristivosti vjetro-agregata govori Betzov zakon. Betzov zakon matematički prikazuje stupanj aerodinamičke pretvorbe koji je jednak omjeru snage na vratilu vjetroagregata i raspoložive snage u slobodnoj struji vjetra. Lopatica iskrivljuje struju vjetra koji nastrujava na nju i tako stvara uzgon koji pokreče lopaticu, no kako vjetar mora nastaviti strujat i nakon prolaska preko lopatice nije moguće iskoristiti svu kinetičku energiju vjera i zbog toga postoji stupanj iskoristivosti. Najveći mogući stupanj aerodinamičke pretvorbe je tzv. Betzova granica i ona iznosi 0,593 (16/27). Betzov zakon praktički znači da niti jedan vjetroagregat ne može biti učinkovitiji od 59,3 %.

U nastavku je matematičko odnosno fizikalno objašnjenje. Pri izvodu vrijede pretpostavke: strujanje je nestlačivo, nema gubitaka u ležajevima, protok zraka je horizontalan i konstantan, strujanje je neviskozno i rotor vjetroagregata je bez težine.

Prema zakonu o očuvanju mase:

$$\dot{m} = \rho \cdot A_1 \cdot v_1 = \rho \cdot S \cdot v = \rho \cdot A_2 \cdot v_2 \ , \tag{2.1}$$

gdje su:

$\dot{m}$ - maseni protok,

ρ - gustoća fluida,

v_1 - brzina fluida ispred lopatice,

v_2 - brzina fluida iza lopatice,

v - brzina fluida na lopatici,

S - površina lopatice rotora.

Sila kojom lopatice djeluju na vjetar se prema drugom Newtonovom zakonu može izraziti:

$$F = m \cdot a, \tag{2.2}$$

$$F = m \cdot \frac{dv}{dt}, \tag{2.3}$$

$$F = \dot{m} \cdot \Delta v, \tag{2.4}$$

$$F = \rho \cdot S \cdot v \cdot \left(v_1 - v_2\right). \tag{2.5}$$

Rad koji vrši ta sila za vrlo mali pomak se može izraziti:

$$dW = F \cdot dx. \tag{2.6}$$

Snaga vjetra iznosi:

$$P = \frac{dW}{dx} = F \cdot \frac{dx}{dt} = F \cdot v. \tag{2.7}$$

Ako se uvrsti vrijednost sile iz jednadžbe (2.5) u izraz za snagu (2.7) snaga vjetra je:

$$P = \rho \cdot S \cdot v^2 \cdot \left(v_1 - v_2\right). \tag{2.8}$$

Snaga vjetra se može izračunati i preko izraza za kinetičku energiju:

$$P = \frac{dE_k}{dt} = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot \left(v_1^2 - v_2^2\right). \tag{2.9}$$

Uvrštavanjem izraza za maseni protok (2.1) u izraz za snagu (2.9) dobivamo:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v \left(v_1^2 - v_2^2\right). \tag{2.10}$$

Oba izraza za snagu vjetra su točna pa se mogu izjednačiti:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v\left(v_1^2 - v_2^2\right) = \rho \cdot S \cdot v^2 \left(v_1 - v_2\right). \tag{2.11}$$

Sređivanjem izraza dobivamo:

$$v = \frac{1}{2}\left(v_1 + v_2\right). \tag{2.12}$$

Što znači da se za brzinu vjetra može uzeti srednja vrijednost brzine ispred i iza lopatice.

Za daljnji izvod stupnja aerodinamičke pretvorbe dodatno se sređuje izraz za kinetičku energiju vjetra.

$$\dot{E}_k = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot \left(v_1^2 - v_2^2\right). \tag{2.13}$$

Ako se u izraz (2.13) uvrsti izraz za maseni protok (2.1) i izraz za brzinu (2.12) dobije se

$$\dot{E}_k = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot S \cdot v_1^3 \cdot \left(1 - \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^2 + \left(\frac{v_2}{v_1}\right) - \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^3\right). \tag{2.14}$$

Deriviranjem gornjeg izraza s obzirom na $\frac{v_2}{v_1}$, može se dobiti maksimalna vrijednost za kinetičku energiju, a ona je za vrijednost $\frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{3}$.

S time proizlazi maksimalna vrijednost za snagu vjetra:

$$P_{\max} = \frac{16}{27} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v_1^3. \tag{2.15}$$

Ili sređivanjem dobiva se

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v_1^3 \cdot C_{\mathrm{p}}. \tag{2.16}$$

Vidljivo je da stupanj aerodinamičke pretvorbe C_{p} ima maksimalni iznos 16/27 odnosno 59,3%.

3. Opis modela strujanja

3.1. Osnovne jednadžbe dinamike fluida

Sve jednadžbe dinamike fluida sa izuzetkom energetske jednadžbe su izvedene iz drugog Newtonovog zakona. Jednadžbe koje su u nastavku opisane poznate su pod nazivom Navier-Stokesove jednadžbe. Navier-Stokesove jednadžbe modeliraju laminarno strujanje, a u fizici se koriste za modeliranje vremenskih prognoza, morskih struja, strujanja fluida kroz cijev i nastrujavanja na aeroprofile. Izvode se za tri koordinatna sustava i pri određenim ograničenjima. Navier-Stokesove jednadžbe u nastavku odnose se na strujanje newtonskog, jedno-komponentrnog, nestlačivog, jednofaznog fluida i bez utjecaja elektro-magnetskih sila, izvedene su za materijalni volumen koji mijenja svoj položaj i oblik, ali se uvijek sastoji od istih točaka.

3.1.1. Jednadžba kontinuiteta

Jednadžba kontinuiteta ili zakon očuvanja mase govori da je brzina promjene mase materijalnog volumena jednaka nuli.

$$\frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0 \ . \tag{3.1}$$

3.1.2. Jednadžba količine gibanja

Jednadžba količine gibanja ili zakon očuvanja količine gibanja govori da je brzina promjene količine gibanja jednaka sumi vanjskih masenih i površinskih sila koje djeluju na materijani volumen.

$$\rho\left(\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j}\right) = \mu\left(\frac{\partial^2 v_i}{\partial x_j^2}\right) - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho f_i \ . \tag{3.2}$$

3.1.3. Jednadžba momenta količine gibanja

Jednadžba momenta količine gibanja ili zakon očuvanja momenta količine gibanja govori da je brzina promjene momenta količine gibanja materijalnog volumena, u odnosu na odabrani pol, jednaka sumi momenata vanjskih masenih i površinskih sila koje djeluju na materijalni volumen, u odnosu na taj isti odabrani pol. U slučaju nepostojanja raspodjeljenih momenata na površini ili unutar materijanog volumena zakon se svodi na činjenicu simetričnosti tenzora naprezanja.

3.1.4. Zakon očuvanja energije

Zakon očuvanja energije govori da je brzina promjene zbroja kinetičke i unutarnje energije materijanog volumena jednaka snazi vanjskih masenih i površinskih sila koje djeluju na materijalni volumen, te brzini izmjene topline materijalnog volumena s okolinom.

$$\frac{\partial(\rho cT)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho c v_j T)}{\partial x_j}=-p\frac{\partial v_j}{\partial x_j}+\sum\nolimits_{ji}\frac{\partial v_i}{\partial x_j}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial x_j}\right)+q_{\mathrm{H}}\,, \tag{3.3}$$

gdje je q_{H} volumenska gustoća toplinskih izvora.

3.2. Turbulencija

Strujanje fluida može se podjeliti u dva režima, turbulentno i laminarno, a određeni su Reynoldsovim brojem.

Lamirnarno strujanje je mirno, jednolično strujanje u paralelnim slojevima bez mješanja među njima, bez turbulencija. Laminarno strujanje se pojavljuje za male vrijednosti Reynoldsova broja i može se riješit analitički u ograničenom broju slučajeva.

Tubulentno strujanje fluida je jedan od dva režima strujanja koji je karakteriziran kaotičnim promjenama veličina. Turbulentno strujanje fluida najčešći je oblik strujanja u prirodi, a pojavljuje se uvijek pri visokim vrijednostima Reynoldsova broja. Strujanje oko automobila, aviona, vlaka, strujanje vode oko brodskog trupa, strujanje u vodovodima, plinovodima i drugim cijevnim mrežama problemi su u kojima je strujanje redovito turbulentno.

Turbulentno strujanje fluida ima unutrašnje stupnjeve slobode, jer je nestacionarno za stacionarne rubne uvjete pa analitičko rješavanje takvog strujanja nije moguće. Dakle turbulentno stujanje je nestacionarno strujanje karakterizirano intenzivnim mješanjem fluida koje daje turbulentnom strujanju difuzijski karakter s posljedicom povećanja disipacije energije.

Stupanj turbulencije se mjeri Raynodsovim brojem. Reynoldsov broj bezdimenzijska je veličina i pokazuje omjer inercijskih i viskoznih sila, a može se definirati za različite slučajeve gdje fluid ima relativnu brzinu spram stijenke uz koju struji ili na koju nastrujava. Primjer definiranja Reynoldsova broja korištenog za nastrujavanje zraka na aeroprofile:

$$R = \frac{vc}{\upsilon} , \tag{3.4}$$

gdje su:

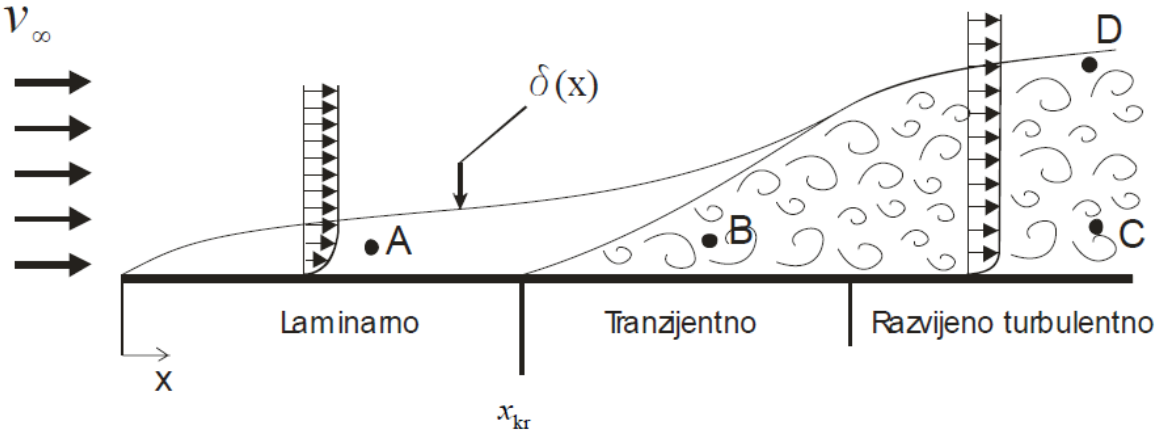
v - brzina leta,

c - duljina tetive aeroprofila,

υ - kinematička viskoznost, za zrak pri nultoj nadmorskoj visini iznosi $1,460 \cdot 10^{-5}$ m^2/s.

Postoje dvije kritične vrijednosti Reynoldsova broja: donja i gornja vrijednost. Donja vrijednost kritičnog Reynoldsova broja je ona ispod koje se ne pojavljuje nestabilnost strujanja, a iznod koje se pojavljuju turbulencije. Gornja vrijednost je ona iznad koje nije zabilježeno laminarno strujanje. Primjer razvijanja turbulentnog strujanja prikazuje slika 2 na primjeru strujanja uz ravnu ploču, gdje se u početku razvija laminarno strujanje koje nakon nakon donje kritične vrijednosti postaje tranzijetno, a nakon gornje kritične granice prelazi u potpuno turbulentno strujanje. Reynoldsov broj za strujanje uz ploču iznosi:

$$R = \frac{v \cdot x}{\nu} . \tag{3.5}$$



Slika 2. Turbulentno strujanje uz ploču

Zbog kaotičnog načina strujanja i pulsacija vrijednosti u turbulentnom režimu strujanja pulsiraju, turbulentno strujanje se ne može analitički riješit već postoje razni modeli. Modeli turbulencije temelje se na eksperimentalnim rješenjima i svaki ima svoje prednosti i nedostatke te uvjete u kojima daje bolje ili lošije rezultate. U nastavku su opisana dva modela strujanja koja su najviše u uporabi, a oba su implementirana u programski paket Fluent.

3.2.1. K-epsilon (*k*-*ε*) model turbulencije

K-*ε* model načešće je korištni model u CFD analizi turbulentnih strujanja. Model dodatno uključuje dvije parcijalne diferencijalne jednadžbe transporta za opis strujanja. Prva jednadžba tansporta označena s *k* u nazivu modela se odnosi na kinetičku energiju turbulencije, a druga jednadžba označena s *ε* u nazivu modela se odnosi na stupanj disipacije kinetičke energije turbulencije. Za razliku od ostalih modela *k*-*ε* model se odnosi na mehanizme koji utječu na kinetičku energiju turbulencije. Pretpostavka modela je da je turbulentna viskoznost izotropska, odnosno omjer Reynoldsova naprezanja i deformacije je jednak u svim smjerovima. Kinetička energija turbulencije sadržana je u pulsacijama turbulentnih trujanja, a jednadžba za kinetičku energiju turbulencije glasi:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho\bar{k}\right)+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho\bar{v}_j\bar{k}\right)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu\frac{\partial\bar{k}}{\partial x_j}-\rho\overline{v_j'k'}-\overline{p'v_j'}\right)-\overline{\mu\frac{\partial v_i'}{\partial x_j}\frac{\partial v_i'}{\partial x_j}}-\rho\overline{v_i'v_j'}\frac{\partial\bar{v}_i}{\partial x_j}\ , \tag{3.6}$$

gdje se pojavljuju članovi lokalne i konvekcijske promjene, molekularne i konvekcijske turbulentne difuzije, izvorski član te disipacija kinetičke energije. Transportna jednadžba disipacije kinetičke energije turbulenije glasi:

$$\begin{aligned}&\frac{\partial\left(\rho\bar{\varepsilon}\right)}{\partial t}+\frac{\partial\left(\rho\overline{v_j\varepsilon}\right)}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu\frac{\partial\bar{\varepsilon}}{\partial x_j}-\rho\overline{v_j'\varepsilon'}-2\nu\overline{\frac{\partial v_j'}{\partial x_k}\frac{\partial p'}{\partial x_k}}\right)-2\rho\nu^2\overline{\frac{\partial^2 v_i'}{\partial x_j\partial x_k}\frac{\partial^2 v_i'}{\partial x_j\partial x_k}}-\\&-2\mu\frac{\partial\bar{v}_i}{\partial x_j}\left(\overline{\frac{\partial v_i'}{\partial x_k}\frac{\partial v_j'}{\partial x_k}}+\overline{\frac{\partial v_k'}{\partial x_j}\frac{\partial v_k'}{\partial x_i}}\right)-2\mu\overline{\frac{\partial^2 v_i'}{\partial x_k\partial x_j}\frac{\partial v_i'}{\partial x_k}v_j'}-2\mu\overline{\frac{\partial v_i'}{\partial x_k}\frac{\partial v_j'}{\partial x_k}\frac{\partial v_i'}{\partial x_j}}\end{aligned}\ . \tag{3.7}$$

Jednadžba (3.7) se sastoji od izraza za lokalnu promjenu, konvektivnog člana, molekularne i turbulentne difuzije, te izraza za ponor i izraza za generaciju koji smanjuju odnosno povećavaju ε.

Iako je ovo jedan od najkorištenijih modela nije preporučljiv za modele strujanja gdje postoje veliki gradijenti tlaka. Model je također jednostavan jer zahtjeva samo početne i rubne uvjete za rješavanje, ali je jako zahtjevan po pitanju memorije što je logično zbog dodatne dvije jednadžbe koje uvodi u proračun.

3.2.2. K-omega (*k-ω*) model turbulencije

Postoje dvije izvedbe *k-ω* modela, standard i SST (shear-stress transport) i oba su implementirana u Fluent. Oba modela su sličnih izvedbi jer koriste dvije dodatne transportne jednadžbe za *k* i *ω*. Razlika u modelima je u različitim formulacijama u graničnom sloju te u tome što SST model za područje podalje od stijenki u području visokih iznosa Reynoldovih brojeva koristi *k-ε* model. Također SST model koristi modificiranu jednadžbu za turbulentnu viskoznost pri izračunavanju sila na stijenku. U nastavku je opisan SST k-ω model jer je korišten za CFD simulaciju u ovom diplomskom radu.

SST *k-ω* model je razvio F. R. Menter [2] kako bi poboljšao standarni *k-ω* model u blizini stijenke, a koristeći *k-ε* model podalje od stijenke. Da bi to postigao konvertirao je *k-ε* u *k-ω* formulaciju. Navedena svojstva SST model čine prikladnim za korištenje nego standarni model pri opisivanju opstrujavanja aeroprofila, nadzvučnih strujanja, strujanja velikih gradijenata tlaka itd.

Model je empiričkog karaktera te koristi dvije dodatne transportne jednadžbe. Jednadžbu za kinetičku energiju turbulencije *k* i jednadžbu za brzinu specifične disipacije energije *ω*.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k)+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_i)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j}\right)+\tilde{G}_k-Y_k+S_k \ , \tag{3.8}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j}\right)+G_\omega-Y_\omega+D_\omega+S_\omega \ . \tag{3.9}$$

U jednadžbama (3.8) i (3.9) $\tilde{G}_k$ predstavlja produkciju turbulentne kinetičke energije zbog gradijenata prosječne brzine, G_ω predstavlja produkciju *ω*, Γ_k i Γ_ω predstavljaju efektivnu difuzivnost *k* i *ω*, Y_k i Y_ω predstavljaju disipaciju *k* i *ω* uslijed turbulencije, D_ω predstavlja poprečnu difuziju, a S_k i S_ω su izrazi definirani od strane korisnika.

Efektivna difuzivnost se izračunava prema izrazima

$$\Gamma_k=\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k} \ , \tag{3.10}$$

$$\Gamma_\omega=\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \ , \tag{3.11}$$

gdje su σ_k i σ_ω Prandtlovi brojevi za *k* i *ω*. Turbulenta viskoznost se proračunava pomoću izraza

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \frac{1}{\max\left[\frac{1}{\alpha^*}, \frac{SF_2}{\alpha_1 \omega}\right]} , \tag{3.12}$$

gdje je *S* brzina deformacija, a σ_k i σ_ω se izračunavaju prema

$$\sigma_k = \frac{1}{F_1 / \sigma_{k,1} + (1 - F_1) / \sigma_{k,2}} , \tag{3.13}$$

$$\sigma_\omega = \frac{1}{F_1 / \sigma_{\omega,1} + (1 - F_1) / \sigma_{\omega,2}} . \tag{3.14}$$

Mješane funkcije F_1 i F_2 su dane izrazima

$$F_1 = \tanh(\Phi_1^4) , \tag{3.15}$$

$$\Phi_1 = \min\left[\max\left(\frac{\sqrt{k}}{0,09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega}\right), \frac{4\rho k}{\sigma_{\omega,2} D_\omega^+ y^2}\right] , \tag{3.16}$$

$$D_\omega^+ = \max\left[2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega,2}} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-10}\right] , \tag{3.17}$$

$$F_2 = \tanh(\Phi_2^2) , \tag{3.18}$$

$$\Phi_2 = \max\left(2\frac{\sqrt{k}}{0,09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega}\right) , \tag{3.19}$$

gdje je *y* udaljenost do iduće površine, a D_ω^+ je pozitivni udio izraza poprečne difuzivnosti.

Produkcija turbulentne kinetičke energije i specifične disipacije se izračunava prema izrazima

$$\tilde{G}_k = \min(G_k, 10\rho\beta^* k\omega) , \tag{3.20}$$

$$G_\omega = \frac{\alpha}{\nu_t} G_k . \tag{3.21}$$

Disipacija kinetičke energije Y_k i disipacija brzine specifične disipacije Y_ω su definirani

$$Y_k = \rho\beta^* k\omega , \tag{3.22}$$

$$Y_k = \rho\beta\omega^2 . \tag{3.23}$$

Kako je SST model sačinjen od standardnog *k-ω* i standardnog *k-ε* modela, da bi se ukomponirala oba modela u jedan *k-ε* model je transformiran u *k-ω* model što je dovelo do uvođenja poprečno-difuzivnog izraza D_ω koji glasi

$$D_\omega = 2(1-F_1)\rho\sigma_{\omega,2}\frac{1}{\omega}\frac{\partial k}{\partial x_j}\frac{\partial \omega}{\partial x_j} \ . \tag{3.24}$$

3.3. Frame motion

Svaki model u Fluentu po početnim postavkama je u inercijskom koordinatnom sustavu bez ubrzanja. No moguće je proračunavati i u koordinatnim sustavima s akceleracijom. U ovom slučaju akceleracija koordinatnog sustava se primjenjuje u jednadžbama gibanja. Osnovni primjer ovakvih strujanja su strujanja u rotirajućim strojevima. Sva takva strujanja se mogu modelirati u koordinatnom sustavu koji rotira sa sustavom i tako stvara normalnu komponentu ubrzanja. Ovakav pristup se naziva reference frame motion.

Kada se rješavaju jednadžbe gibanja, u pomičnom koordinatnom sustavu, ubrzanje sustava se implementira u jednadžbama momenta. Dvije su moguće formulacije rješavanja rotirajućih koordinatnih sustava, sa apsolutnom brzinom $\vec{v}$ i relativnom brzinom $\vec{v}_r$. Brzine su povezane jednadžbom

$$\vec{v}_r = \vec{v} - \left(\vec{\Omega}\times\vec{r}\right) \ , \tag{3.25}$$

gdje je $\vec{\Omega}$ vektor kutnog ubrzanja koordinatnog sustava, a $\vec{r}$ vektor položaja.

Lijeva strana jednadžbe momenta za inercijske koordinatne sustave glasi

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho\vec{v}\right) + \nabla\cdot\left(\rho\vec{v}\vec{v}\right) \ . \tag{3.26}$$

Za rotirajući koordinatni sustav lijeva strana jednadžbe u apsolutnoj formulaciji glasi

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho\vec{v}\right) + \nabla\cdot\left(\rho\vec{v}_r\vec{v}\right) + \rho(\vec{\Omega}\times\vec{v}) \ . \tag{3.27}$$

Dok je za rotirajući koordinatni sustav u relativnoj formulaciji lijeva strana momentne jednadžbe

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\vec{v}_r) + \nabla\cdot(\rho\vec{v}_r\vec{v}_r) + \rho(2\vec{\Omega}\times\vec{v}_r + \vec{\Omega}\times\vec{\Omega}\times\vec{r}) + \rho\frac{\partial\vec{\Omega}}{\partial t}\times\vec{r} \ , \tag{3.28}$$

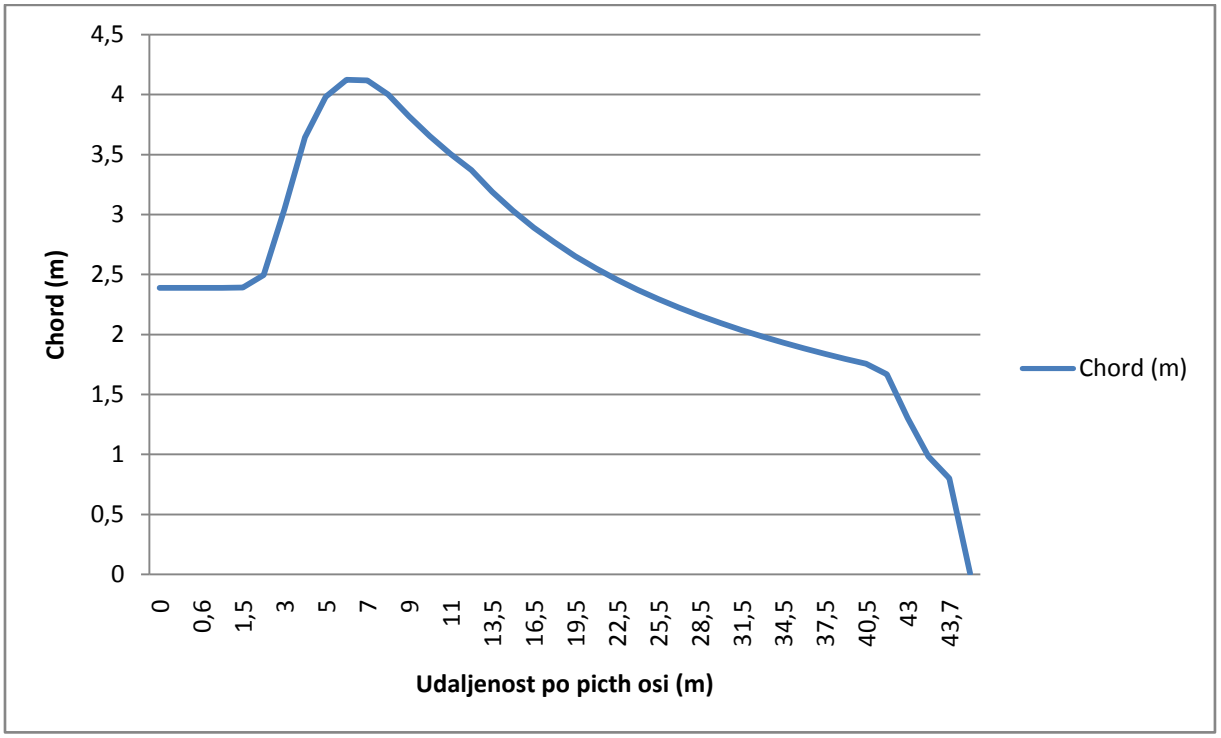
gdje je $\rho(2\vec{\Omega}\times\vec{v}_r)$ Coriolisova sila.

Za protoke u rotirajućim domenama jednadžba očuvanja mase se izračunava jednako za relativnu i apsolutnu formulaciju

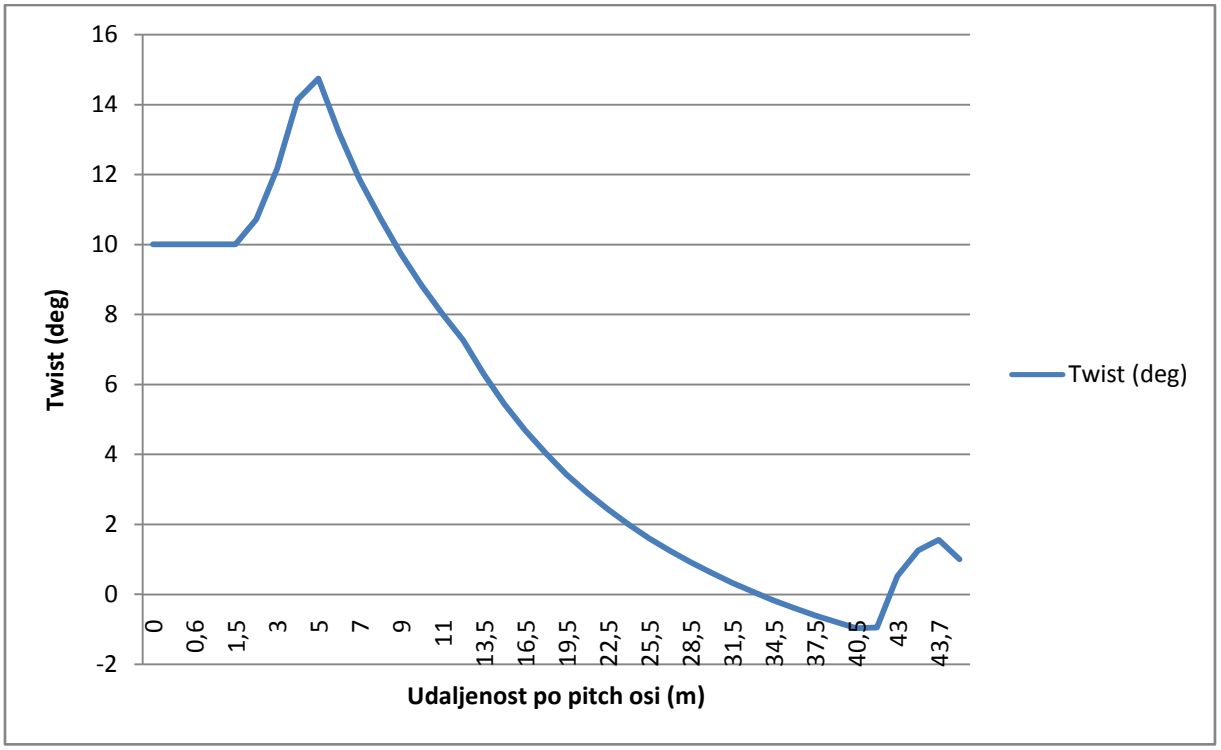
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}_r) = S_m \ . \tag{3.29}$$

4. Definicija geometrije lopatice rotora

Na rotoru se nalaze tri iste lopatice. Svaka lopatica je definirana pomoću šest aeroprofila raspodjeljenih uzduž „pitch“ osi i pod određenim „twist“ kutom. Geometrija je pojednostavljena time što se „pitch“ i „twist“ osi poklapaju. Pitch os je os koja je definirana time da prolazi kroz središta oko kojih se razvijaju aeroprofili. Slike 3 i 4 prikazuju zakret lopatice oko twist osi i duljinu tetive (chord) duž pitch osi.

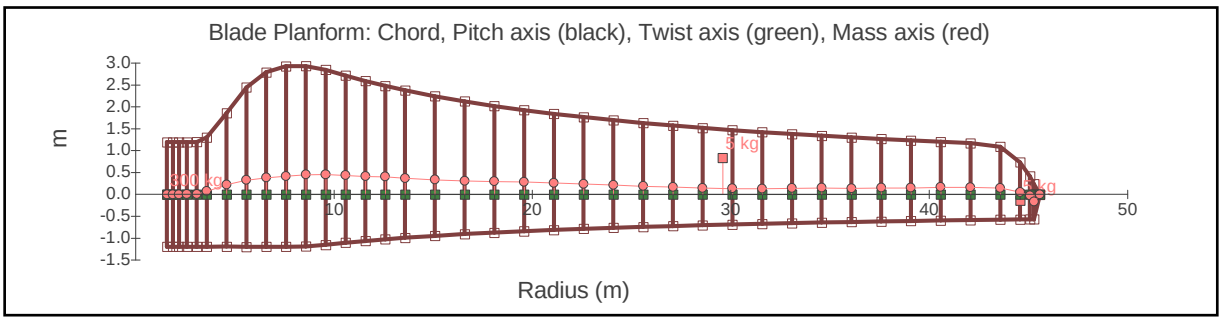


Slika 3. Promjena duljine chorda aeroprofila duž lopatice



Slika 4. Promjena twista kuta duž lopatice

Prikaz promjene chorda po lopatici te pitch i twist osi prikazuje slika 5.



Slika 5. Prikaz osi na lopatici

4.1. Definiranje aeroprofila

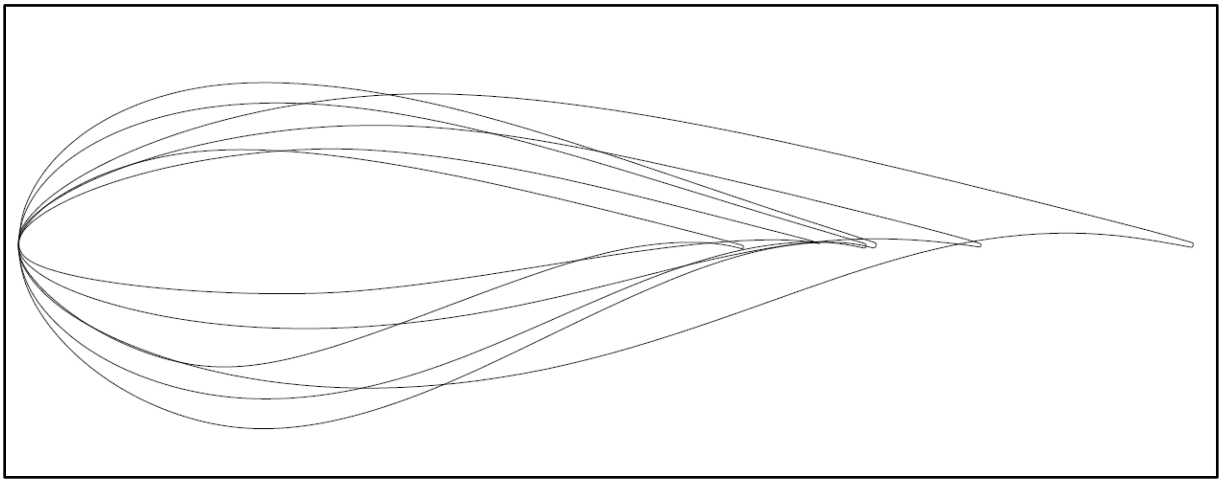
Položaj svakog porofila je određen njegovim chordom i debljinom (thicknessom u postocima). Točan položaj svakog profila je određen interpolacijom po polinomu 3. reda u Matlabu, a tablica 1 prikazuje konačni raspored profila.

Profil	Udaljenost po pitch osi (m)	Chord (m)	Twist (deg)	Thichness (%)
Kružnica	Od 0 do 1	2,39	10	100
DU 99-W-405.lm	6,1083	4,1232	13,1771	40
DU 99-W-350.lm	7,4373	4,0784	11,3380	35
DU 97-W-300.lm	11,0954	3,4906	7,9363	30
DU 91-W2-250.lm	17,2307	2,8294	4,3593	25
DU 93-W-210.lm	25,0385	2,3190	1,7165	21
NACA 64-618	34,5	1,933	-0,16	18

Tablica 1. Položaji i geometrija profila

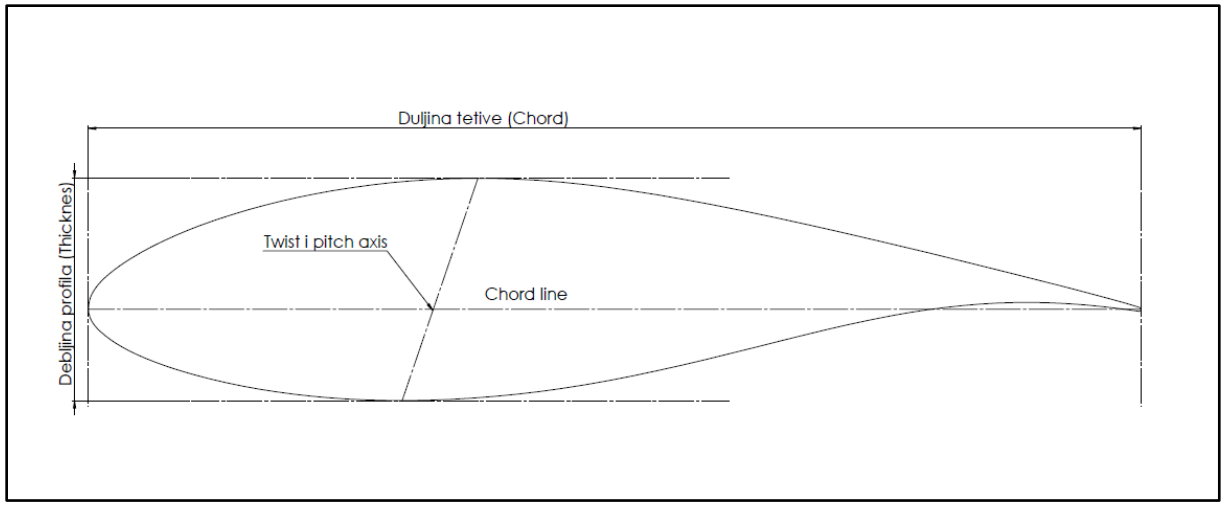
Zbog dužine naziva svi će se profili u nastavku skraćeno označavati prema thicknessu: DU40, DU35, DU30, DU25, DU21, NA64618.

Profili i njihovi položaji iz tablice 1 su korišteni za modeliranje lopatice. Slika 6 prikazuje aeroprofile skalirane na pripadajuću duljinu tetive.



Slika 6. Aeroprofili

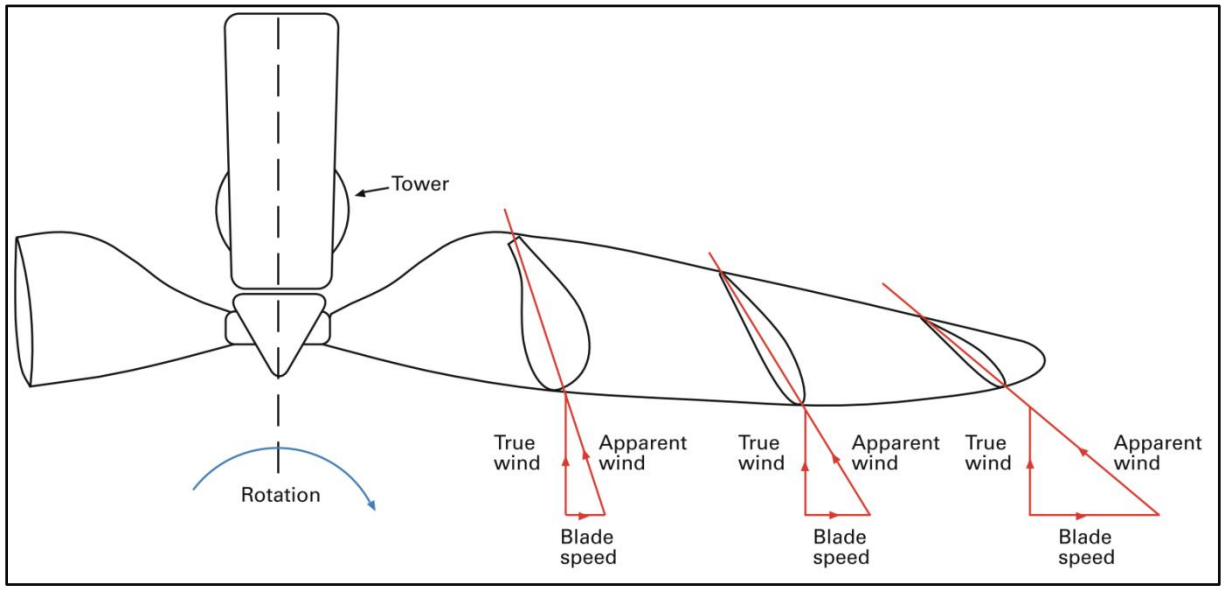
Profili na slici 6 i u tablici 1 nisu potpuno identični kao profili koji se nalaze na Končarovom vjetroagregatu, tj. na slikama 3, 4 i 5. Imaju istu osnovu ali postoje male razlike. Profili su skalirani na točne duljine tetive i za te vrijednosti chorda postoje odstupanja u thichnessu koja iznose najviše 1,2493%. Svi krajevi aeroprofila (trailing edge) završavaju vertikalnom linijom radi lakšeg kreiranja mreže konačnim volumenima. Dimenzije koje definiraju geometriju aeroprofila prikazuje slika 7.



Slika 7. Dimenzije aeroprofila

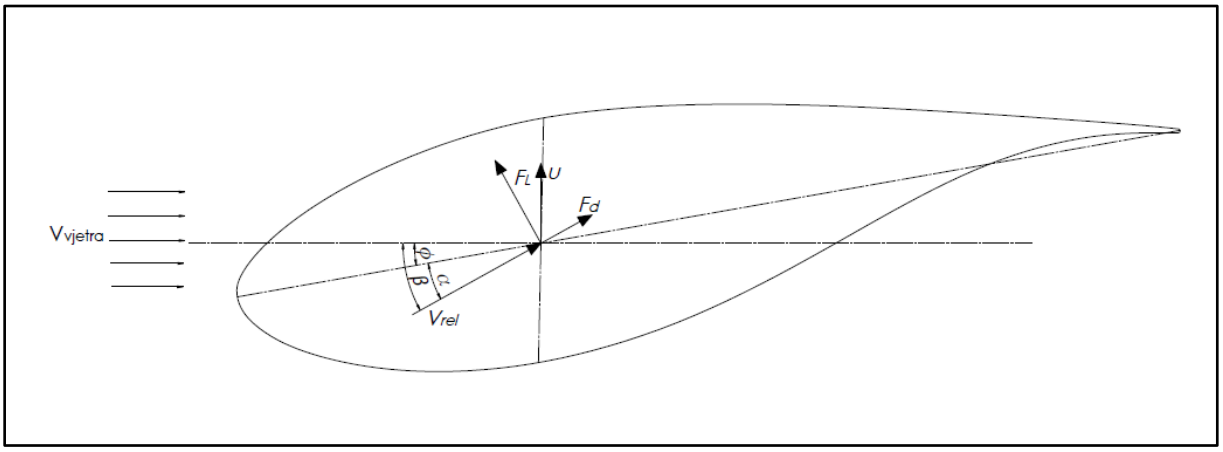
4.2. Definiranje napadnog kuta i sila

Zbog vrtnje rotora i kutne brzine lopatica svaki aeroprofil ima svoju obodnu brzinu. Različite obodne brzine uzrokuju to da će vjetar na profile nastrujavati relativnom brzinom pod određenim kutem koji će se razlikovati za svaki profil. Slika 8 prikazuje promjenu napadnog kuta i relativne brzine nastrujavanja vjetra sa promjenom obodne brzine duž lopatice.



Slika 8. Promjena napadnog kuta i relativne brine vjetra

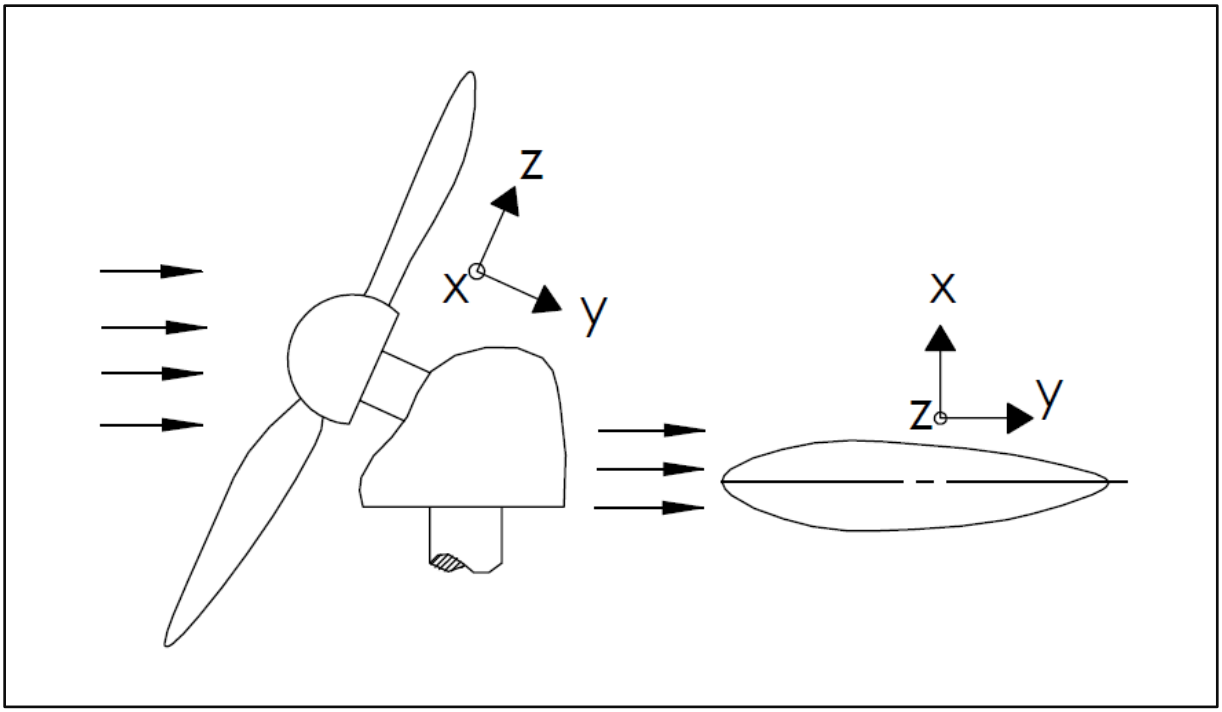
Kao sto je vidljivo iz slike 8 profili koji se nalaze dalje od korijena lopatice će imati veće obodne brzine što će uzrokovati veće relativne brzine nastrujavanja na profile te veće napadne kuteve. Napadni kut je definiran kao kut između chord osi profila i vektora relativnog nastrujavanja vjetra. Napadni kut ima velik utjecaj na konačni proračun sile i koeficijenata na profil, a slika 9 prikazuje profil sa definiranim kutevima i silama koje na njega djeluju.



Slika 9. Definicija napadnog kuta

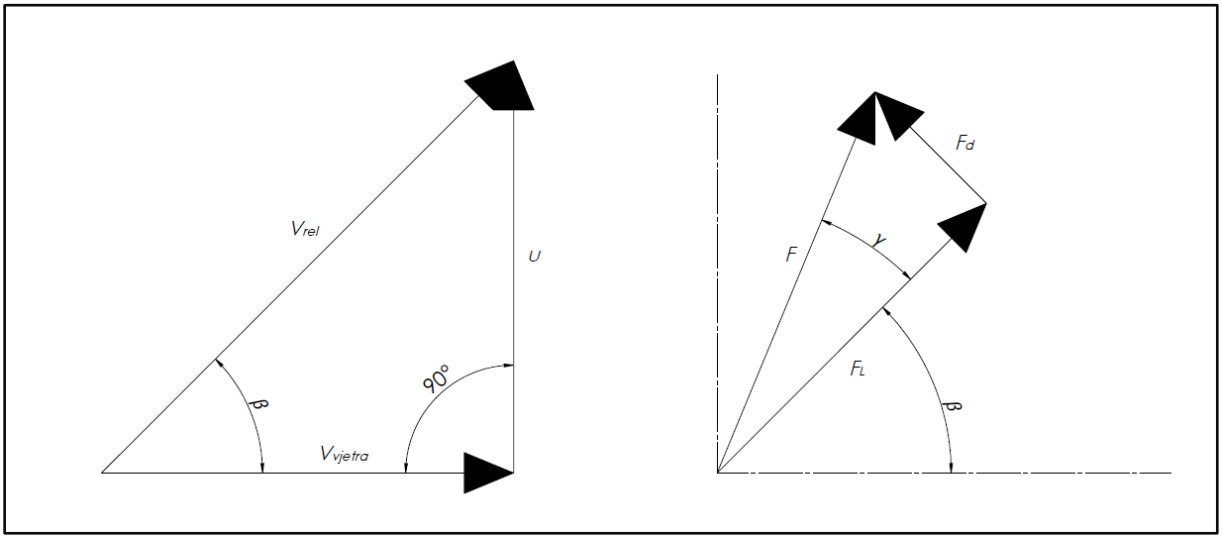
Kao što je vidljivo na slici 9 lopatica se može zakrenuti za određeni pitch kut koji zbrojen sa twist kutem svakog profila definira ukupni zakret profila na horizontalnu os koju je definirana kao nulta vrijednost zakreta. Za određeni pitch kut za koji je zakrenuta cijela lopatica aeroprofili će se razlikovati za twist kut koji je svojstven za svaki profil, a čija je promjena po dužini lopatice prikazana na slici 4. Na slici je vidljivo i da je vektor brzine V_{rel} za koji se radi proračun nastrujavanja na aeroprofil različit od brzine vjetra V_{vjatra} , a uzrok tome je obodna brzina kojom svaki profil rotira oko rotora.

Profil na slici 9 kao i svi ostali profili su definirani kako bi ih vidio promtrač da je lopatica u položaju kao kazaljka na satu u trenutku 12h te da promatrač sjedi na gondoli sa pogledom kroz lopaticu i nastrujavanjem vjetra u lijevo rame. Takav pogled je osigurao da obodna brzina profila gleda okomito prema gore, napadni kutevi na donjoj stranici profila su pozitivni, a pitch i twist zakret lopatice je pozitivan u smjeru suprotnom od kazaljke na satu. Slika 10 prikazuje poglede pomoću koordinatnih sustava.



Slika 10. Koordinatni sustavi

Sile F_L i F_d su sile uzgona ili „lift-a“ i otpora ili „drag-a“. Sila F_L je uvijek okomita na vektor V_{rel} dok je sila F_d uvijek kolinearna sa vektorom relativnog vjetra. Obje sile se sastoje od zbroja sile tlaka i viskoznosti rastavljenih na vektore u njihovim smjerovima. Zbroj sile uzgona i otpora je ukupna sila koja nastaje nastrujavanjem vjetra na profil te sila koja stvara moment i snagu vjetroagregata. Slika 11 prikazuje sve trokute brzina i sile te kuteve potrebne za izračun snage vjetroagregata.



Slika 11. Trokuti brzina i sila

Sa slike 11 je vidljivo da će vjetar na profil nastrujavati sa većom brzinom i pod kutem β u odnosu na brzinu struje vjetra, a uzrok je obodna brzina profila u. U proračunu brzine vjetra i obodne brzine su poznate kao i kutevi β i ϕ dok se ostalo proračunava na način:

$$\phi = \vartheta_{twist} + \vartheta_{pitch}, \tag{4.1}$$

gdje je ϕ ukupni zakret profila s obzirom na horizontalu dok su ϑ_{twist} kut zakreta profila prikazan slikom 4, a kut ϑ_{pitch} kut za koji je zakrenuta cijela lopatica i koji je podesiv.

$$V_{rel} = \sqrt{V_{vjetra}^2 + u^2}, \tag{4.2}$$

gdje je u obodna brzina:

$$u = r \cdot \omega, \tag{4.3}$$

gdje je r udaljenost profila od rotora, a ω kutna brzina rotora.

Napadni kut α se proračunava na način:

$$\beta = tg^{-1} \frac{u}{v_{vjetra}}, \tag{4.4}$$

$$\alpha = \beta - \phi \ . \tag{4.5}$$

Nakon izračuna napadnog kuta i relativne brzine vjetra moguće je napravit računalnu simulaciju pomoću koje se dobiju sile koje je potrebno zbrojit i preslika na smjer vektora obodne brzine kako bi se mogla izračunati snaga kako to i prikazuje slika 11.

$$\gamma = \sin^{-1} \frac{F_L}{F}, \tag{4.6}$$

$$F = \sqrt{F_L + F_d}, \tag{4.7}$$

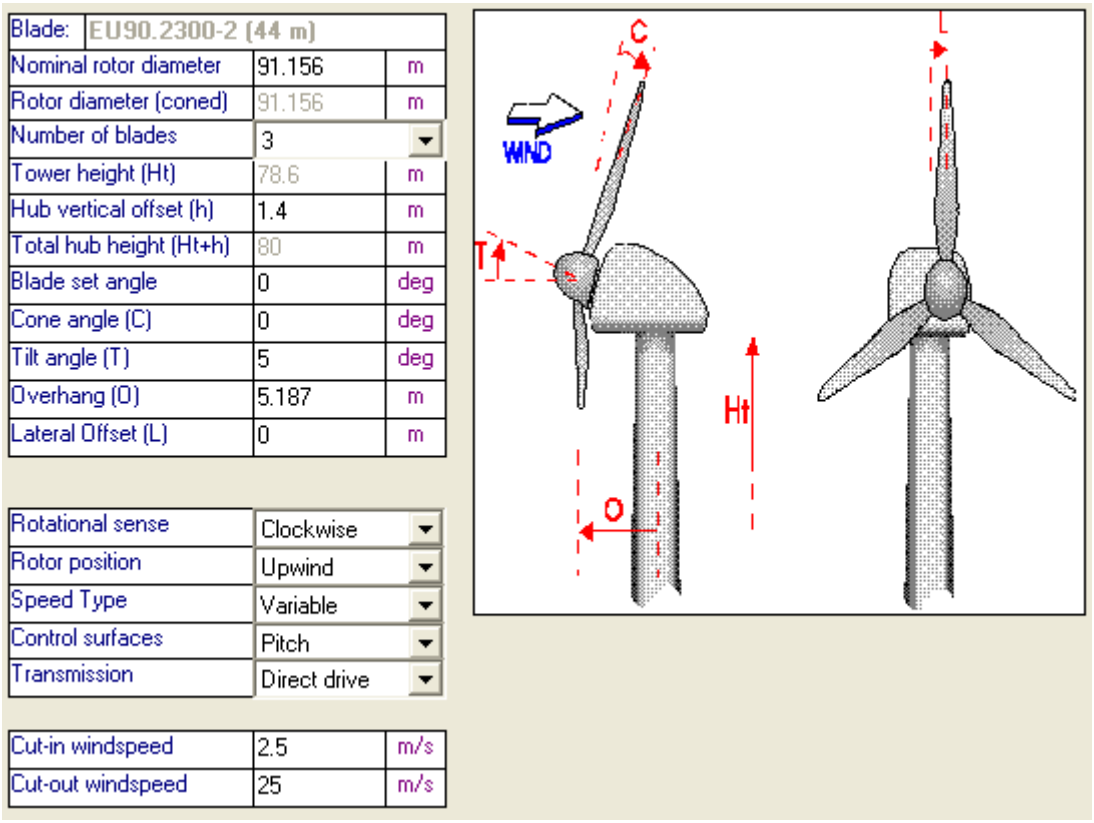
$$F_u = F \cdot \cos\left(90 - \beta - \gamma\right). \tag{4.8}$$

Ovisno o napadnom kutu sila F_u može biti ili u smjeru obodne brzine i stvarati snagu ili u suprotnom smjeru i oduzimati snagu, odnosno kočiti lopaticu.

Na ovaj način su proračunate sile i snaga u 2D simulaciji vjetroagregata, te će ti podaci kasnije biti uspoređeni sa 3D simulacijom.

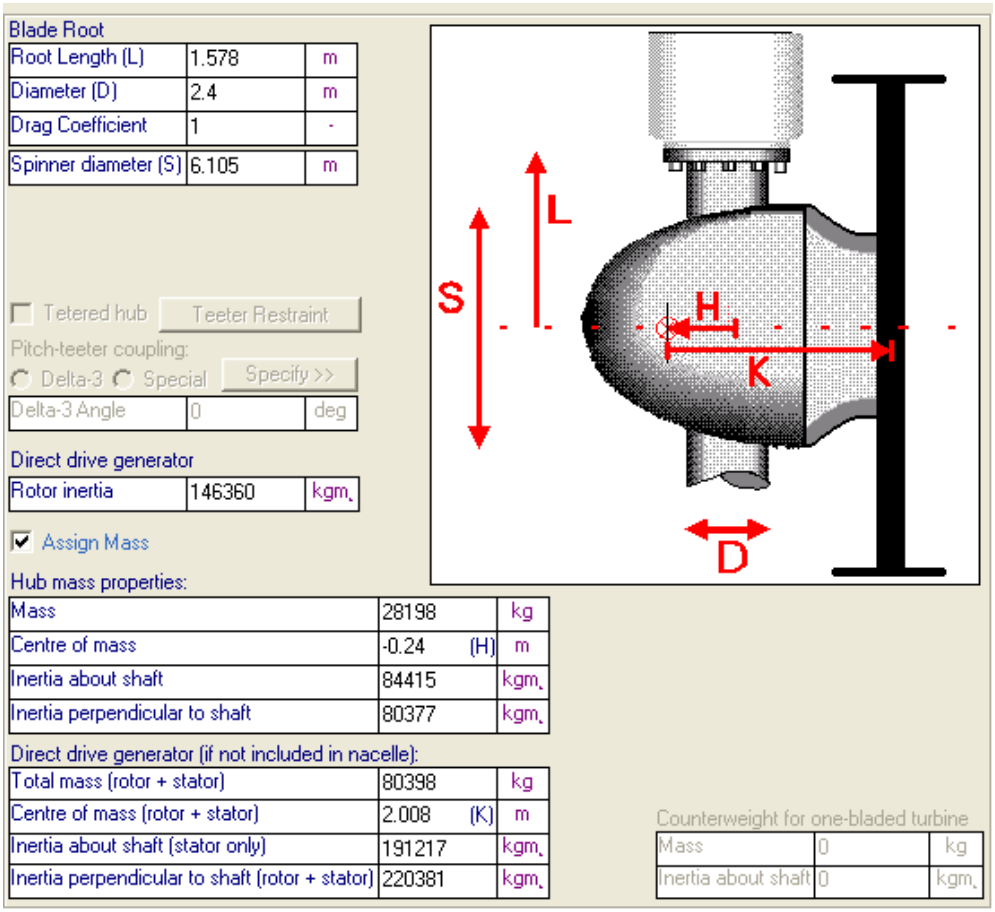
4.3. Osnovni podaci o vjetroagregatu

Agregat za koji je proveden proračun i simulacija je Končarov vjetroagregat snage 2,5 MW. Na slikama 3 i 4 su već definirane dimenzije lopatica. Agregat ima tri lopatice duljine 44 m duž pitch osi. U nastavku su priložene slike i dimenzije koje su bile potrebne za proračun.

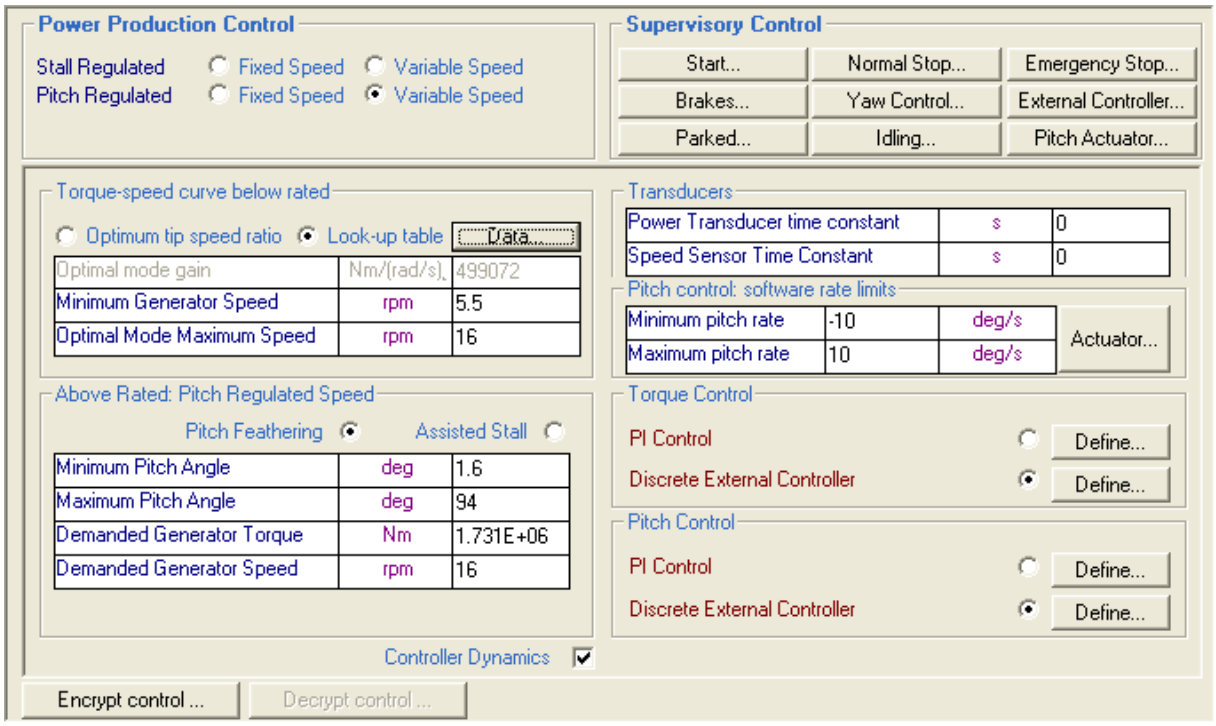


Slika 12. Osnovne dimenzije

Kao što je vidljivo na slici 12 lopatice su zakrenute za tilt angle od 5^o no taj kut je u ovom proračunu zanemaren. Za lopaticu u polažaju kazaljke na satu u smjeru 3h i 9h taj kut dodaje dodatni odnosno oduzima kut zakreta profila od 5^o. Na slici 14 prikazane su vrijednosti kutne brzine rotora i treba naglasiti da je maksimalna brzina rotora ujedno i optimalna brzina.



Slika 13. Dimenzije glavčine



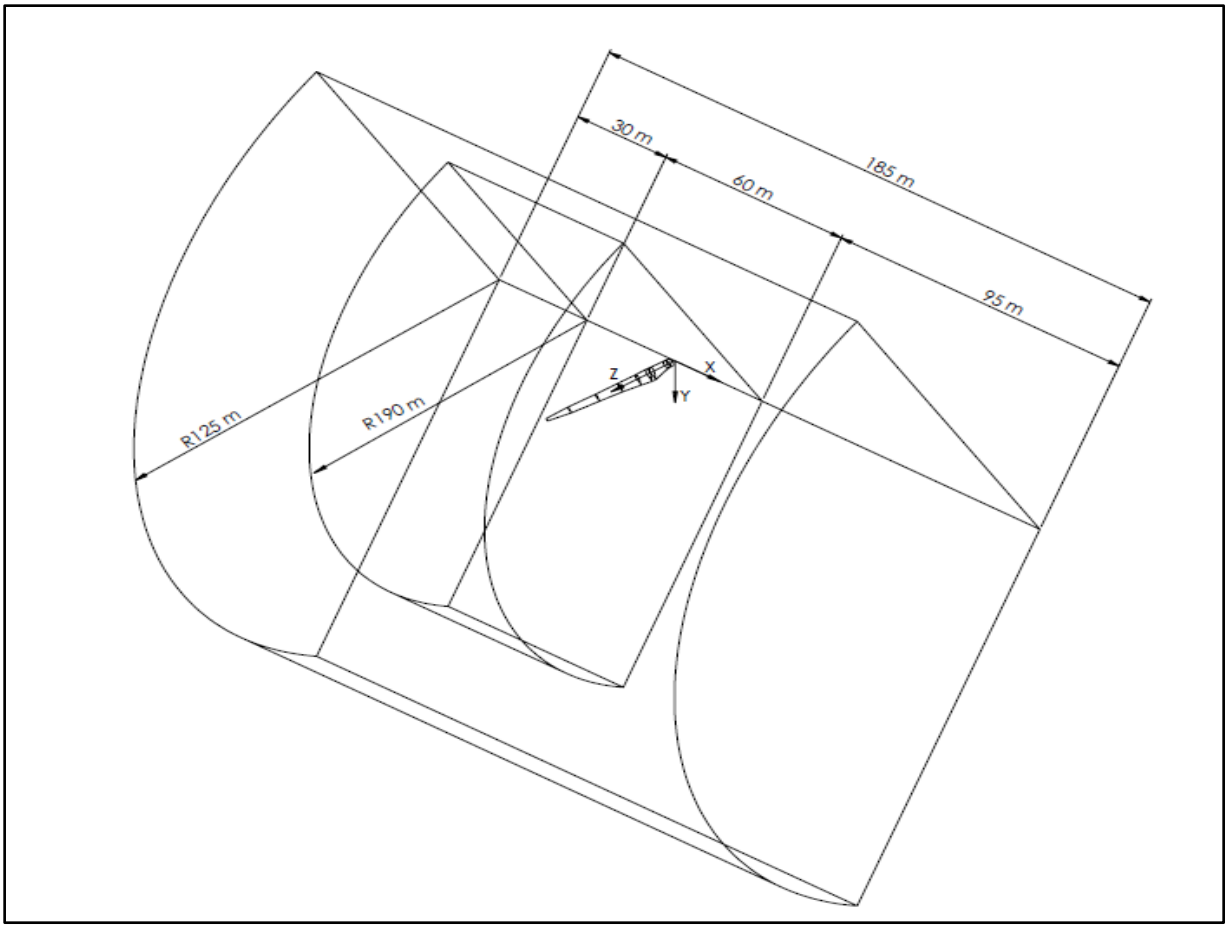
Slika 14. Pitch control

5. Modeliranje i diskretizacija

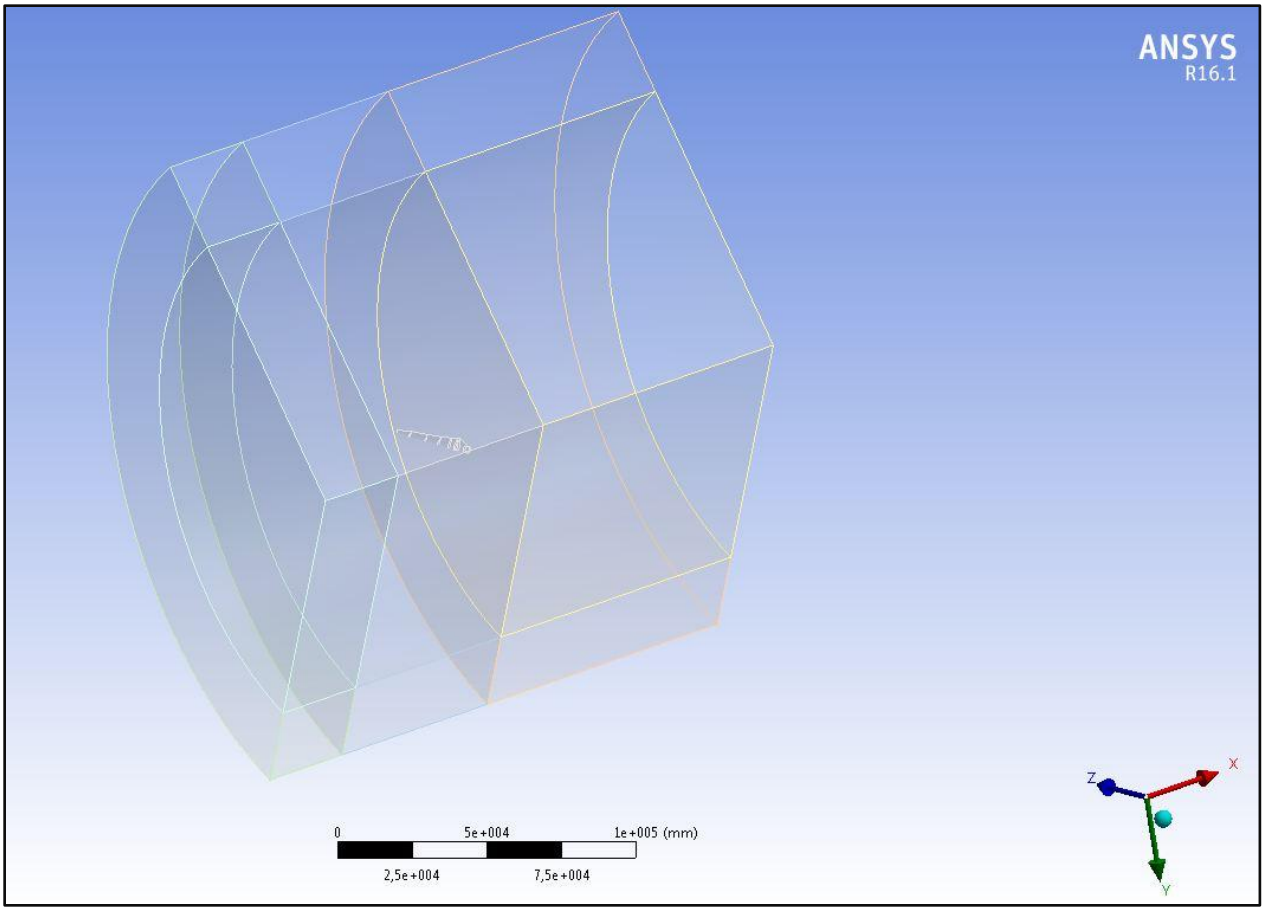
Izračun tlaka, momenta i snage je proračunat pomoću programskog paketa Fluent. U nastavku su opisani modeli i parametri koji su korišteni za računalnu simulaciju. Lopatica je modelirana za pitch kut iznosa 51,84^{o}. Model je kreiran u Solidworksu metodom loft. U modelu su zanemareni gondola, stup i spoj lopatice sa rotorom što će uvest određenu grešku u proračun.

5.1. Diskretizacija

Model je diskretiziran konačnim volumenima u pretprocesorskom paketu Ansys Workbench (ICEM Mesh). Osnovna domena je trećina cilindra, unutar koje se nalazi manji cilindar u čijem središtu je lopatica. Svrha manjeg cilindra je finija mreža oko lopatice. Prostor većeg cilindra je dodatno podjenjen radi lakšeg mesha, odnosno radi stvaranja manjih volumena koji se mogu diskretizitati sweep metodom. Slika 15 prikazuje osnovne dimenzije domene, a slika 16 domenu podjeljenju u podvolumene radi lakšeg diskretiziranja.



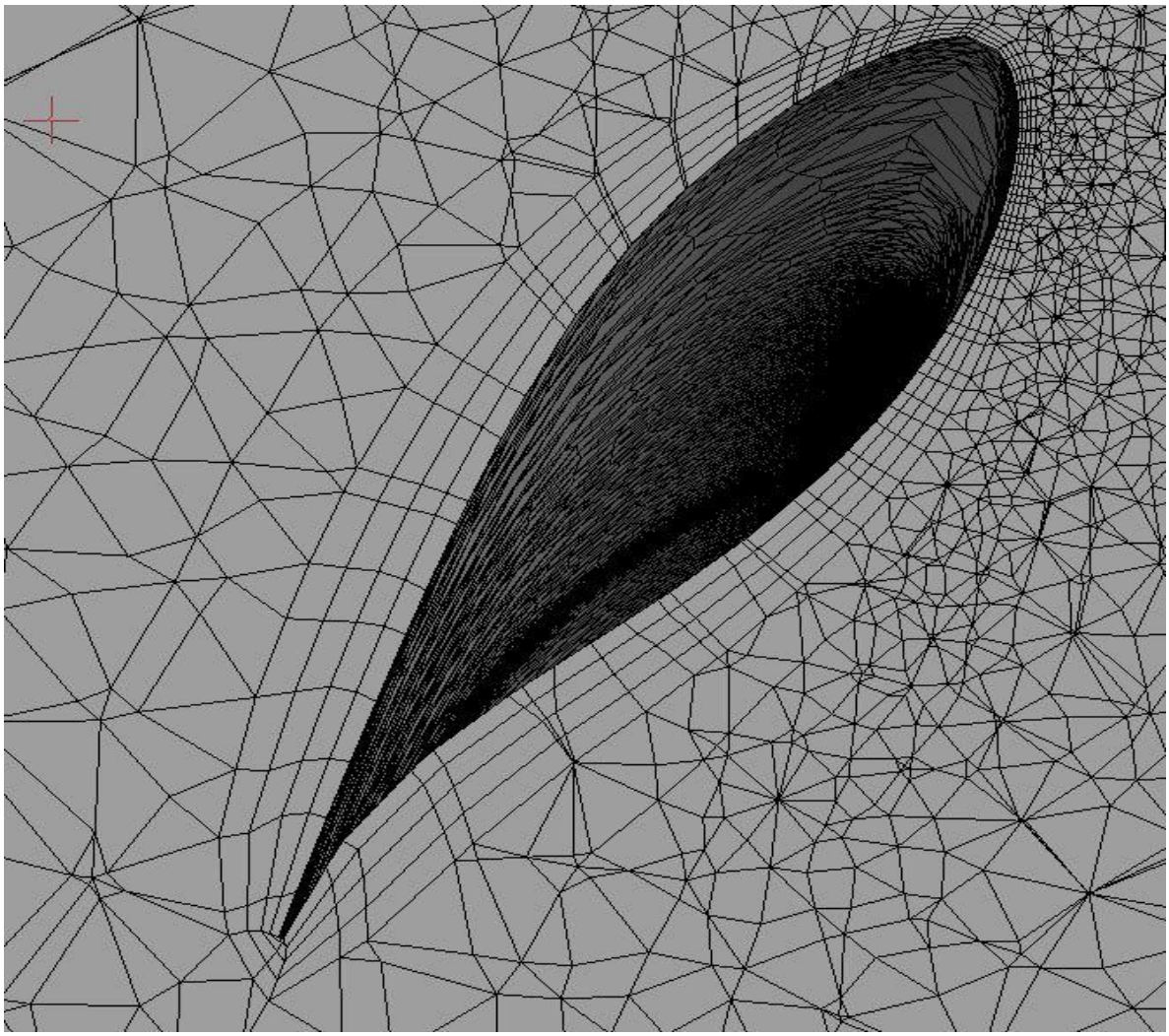
Slika 15. Dimenzije domene



Slika 16. Podjela domene

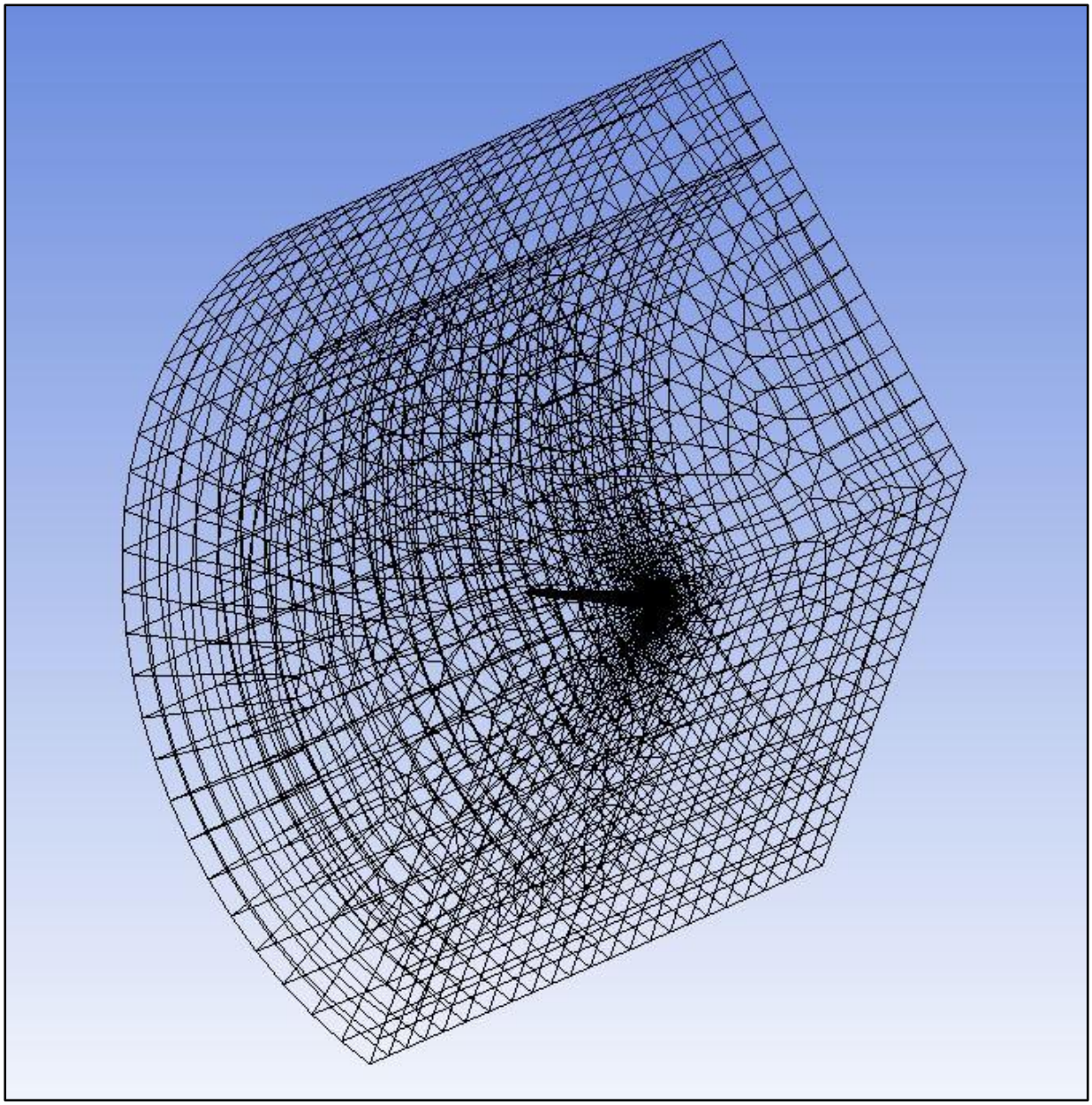
Duljina lopatice je 45 m, te je odmaknuta od ishodišta koordinatnog sustava za 1,578 m radi lakšeg kreiranja mreže u tom djelu domene. Lopatica je udaljena 60 m od ulaza fluida u domenu te 125 m od izlaza fluida iz domene kako bi se formirali neporemećeni profili dosta daleko ispred i iza lopatice. Domena izvan malog cilindra je diskretizirana sweep metodom heksaedrima, dok je domena unutar malog cilindra diskretizirana patch conforming metodom tetraedrima. Linije lopatice su ograničene edge sizeing metodom na duljinu linijskih elemenata 5 mm. Cijela mreža rezultirala je sa ukupnih 6 812 821 elemenata.

Oko lopatice je kreiran granični sloj od četiri sloja, pre inflacijskim algoritmom i korakom rasta 1,1. Na periodičnim površinama postavljen je match control uvijet, vidljiv na slici 19, radi identičnosti mreže kako bi se lakše postavio rubni uvjet periodičnosti u Fluentu. Slika 17 prikazuje granični sloj.



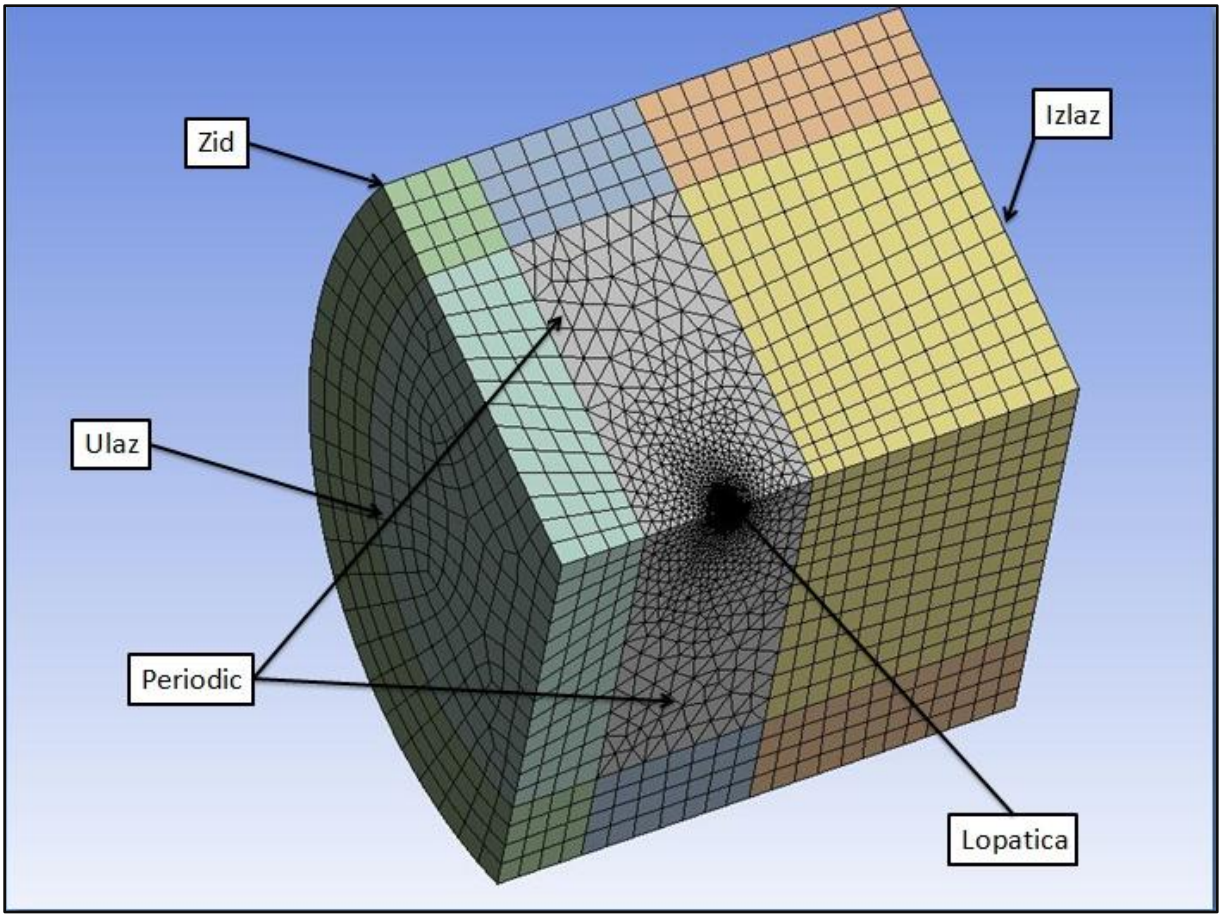
Slika 17. Granični sloj

Kako su volumeni po površini trokutni inflacija je rezultirala sa mrežom sastavljenom od trostranih prizmi na koju se dalje nastavljaju tetraedri. Kvadratna površinska mreža po obodu lopatice nije bila moguća zbog kompleksnosti geometrije, iako bi kvadratni elemeti dali bolje rezultate i smanjili broj elemenata.



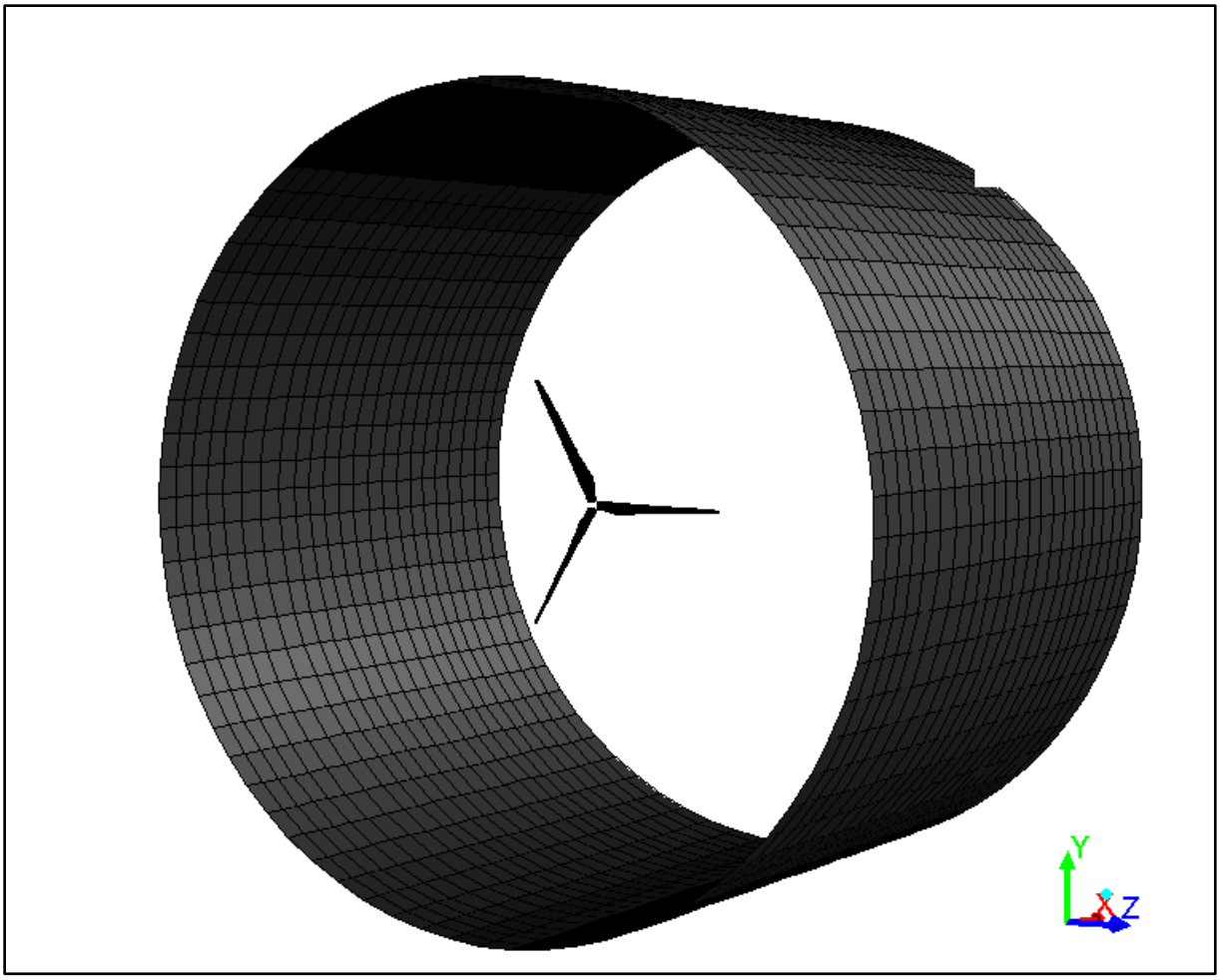
Slika 18. Wireframe mreže

Kako je vidljivo na slici 18 mreža je puno gušća u blizini lopatice što je postignuto edge sizeing uvjetom. Slika 19 prikazuje mrežu sa pripadajućim rubnim uvjetima i prikazom korištenih modela diskretizacije.



Slika 19. Mreža sa rubnim uvjetima

Kako je vidljivo na slici 19 korišteno je pet različitih rubnih uvjeta za opis domene. Ulaz je velocity inlet rubni uvjet i odnosi se na cijelu prednju stranu cilindra. Izlaz je outflow rubni uvjet i definira cijelu zadnju stranu cilindra. Zid je wall rubni uvjet koji definira plašt velikog cilindra, definiran je sa uvjetom da je shear stress jednak nuli kako nebi bilo trenja između fluida i plašta. Naime to trenje nije potrebno za proračun te bi kao takvo samo otežavalo proračun i povečavalo vrijeme simulacije. Lopatica je rubni uvjet wall, ali sa pojavom trenja koje je ovdje jako bitno zbog proračuna sila i momenata na lopaticu. Periodic rubni uvjet se odnosi na dvije unutarnje površine cilindra, a definiran je sa 120^{o}, odnosno još dvije identične domene koje zajedno čine puni cilindar. Periodic rubni uvjet je primjenjen zbog smanjenja vremena proračuna. Na periodic površinama je primjenjeno match control ograničenje. Ovo ograničenje spaja dvije površine istog oblika kako bi bile identično diskretizirane. Na slici 19 je vidljivo da je uvjet održan jer svaka površina na periodic rubnom uvjetu ima svoj par podpovršine koji je identično diskretiziran. Slika 20 prikazuje puni oblik domene sa periodic rubnim uvjetom.



Slika 20. Puni oblik domene sa periodic rubnim uvjetom

5.2. Primjenjeni modeli i postavke simulacije

Za model je korišteno trodimenzijsko, viskozno, turbulentno strujanje nestlačivog fluida. Simulacija je provedena za nestacionarno strujanje.

Za brzinu vjetra V_{vjetra} uzeta je vrijednost 10 m/s. Za dinamičku viskoznost μ je uzeta vrijednost $1{,}7885*10^{-5}$ Pas, a za gustoću 1,225 kg/m^3. Operacijski tlak u domeni je postavljen na 101 325 Pa. Reynoldsov broj je promjenjiv s obzirom da svaki presjek lopatice ima drugačiju brzinu nastrujavanja i duljinu chorda, a proračunava se na način:

$$\mathrm{Re} = \frac{V_{rel} \cdot c \cdot \rho}{\mu}\ , \qquad (5.1)$$

gdje je c duljina tetive (chorda).

Za model turbulencije je korišten SST *k-ω* model.

Za ulazne podatke turbulencije su uzeti turbulent viscosity ratio iznosa 6 i turbulent intensity iznosa 4%. Turbulent viscosity ratio određuje omjer turbulentne i molekularne dinamičke viskoznosti dok turbulent intensity određuje stupanj turbulencije na ulazu u domenu.

Na cijelu domenu je primjenjen uvjet frame motion kojim je definirana rotacija lopatice sa kutnom brzinom 1,6755 rad/s koliko iznosi maksimalna i optimalna kutna brzina vjetroagregata. Ovaj uvijet u pravilu rotira domenu, dok lopatica miruje te je bilo potrebno postaviti rotaciju u suprotnom smjeru kako bi proračun bio fizikalan.

Primjenjen je rubni uvijet periodic, kako bi se dobila stvarna domena punog cilindra, te tako i realniji rezultati.

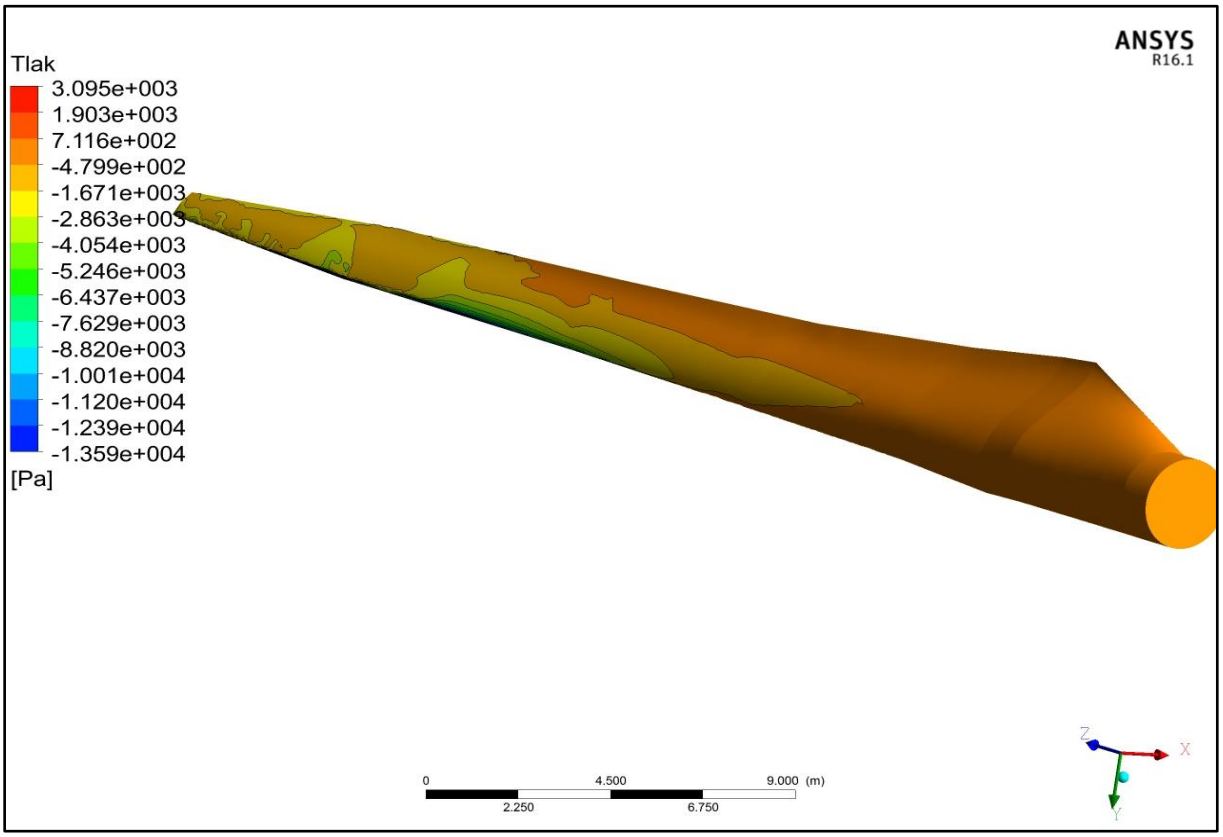
Prostorna diskretizacija je definirana jednadžbama prvog reda, osim za moment i tlak koje su drugog reda. Ovo je ovako odabrano zbog vremena potrebnog za izračun simulacije koje se povečava sa odabirom diskretizacija višeg reda.

Transijentne postavke su podešene za fixed metodu. Vremenski korak je 0,1 s 400 koraka i 10 iteracija po koraku. Ovdje treba naglasiti kako zbog vremenskog ograničenja nije vođeno računa o Courantovom broju. Oko tristotog koraka simulacija je počela konvergirati na osmoj iteraciji što znači da je 10 itaracija bilo dovoljno za konvergenciju cijelog proračuna.

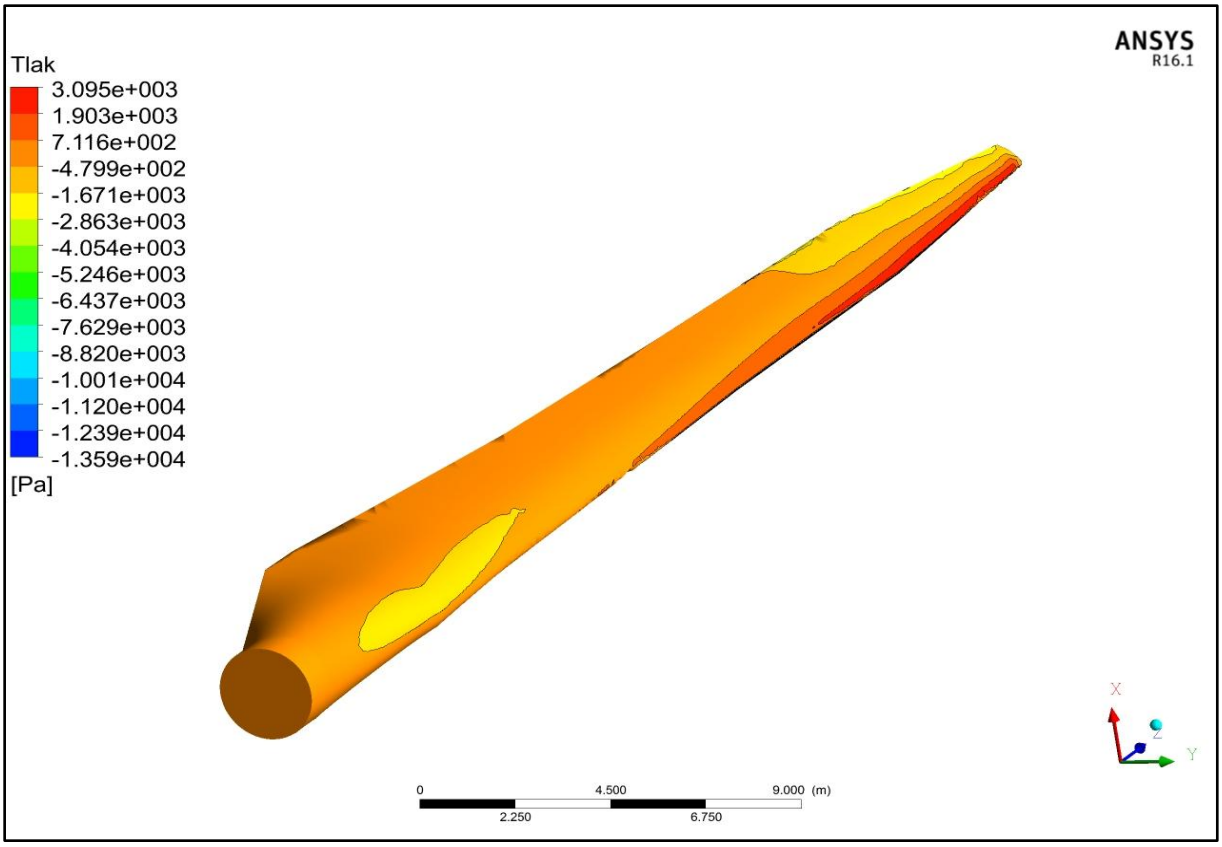
6. Raspored tlaka i brzina

Proračun rasporeda tlaka je dobiven računalnom simulacijom u programskom paketu Fluent. Pri definiranju rubnih uvjeta za lopaticu definirano je da nema klizanja tako da dinamički tlak iznosi nula, a operacijski tlak je postavljen na 101 325 Pa kao okolišni tlak.

Raspodjela statičkog tlaka po obodu lopatice je prikazana na slikama 21 i 22 pri različitim pogledima na lopaticu.



Slika 21. Raspodjela tlaka po obodu lopatice

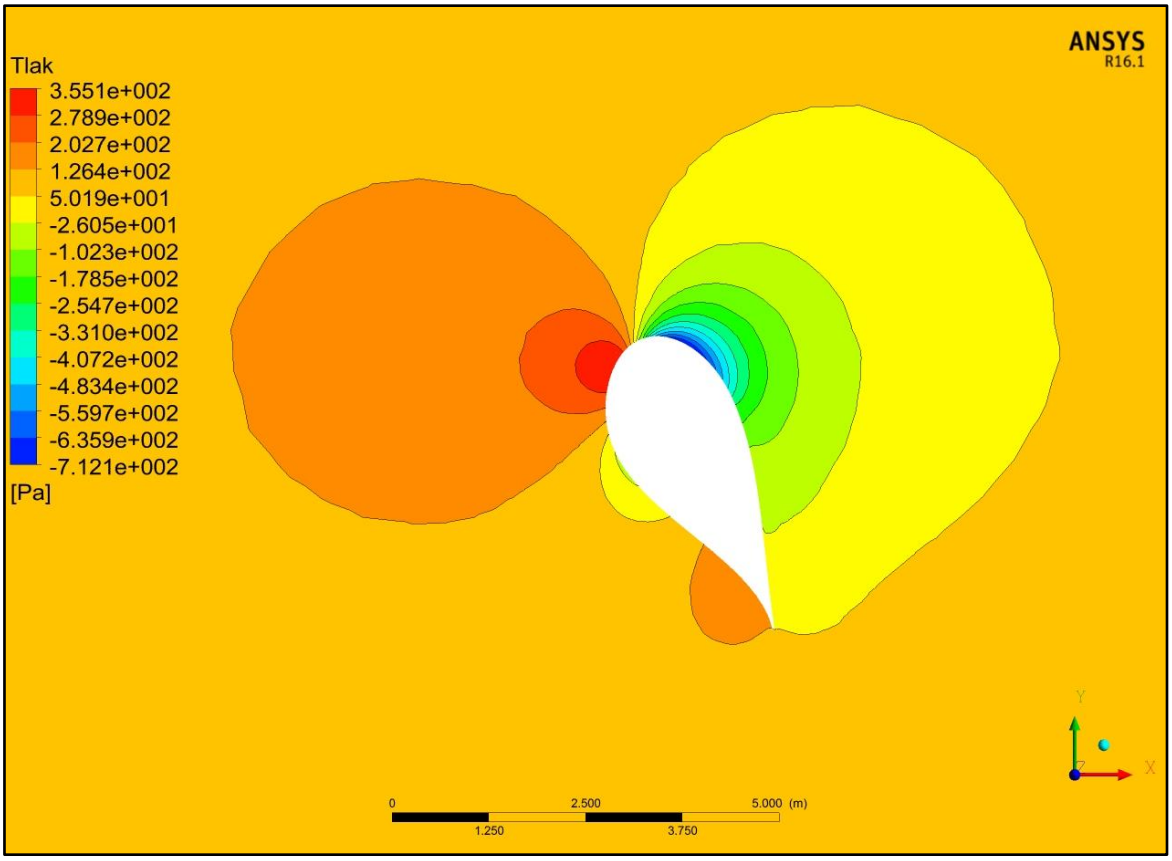


Slika 22. Raspodjela tlaka po obodu lopatice

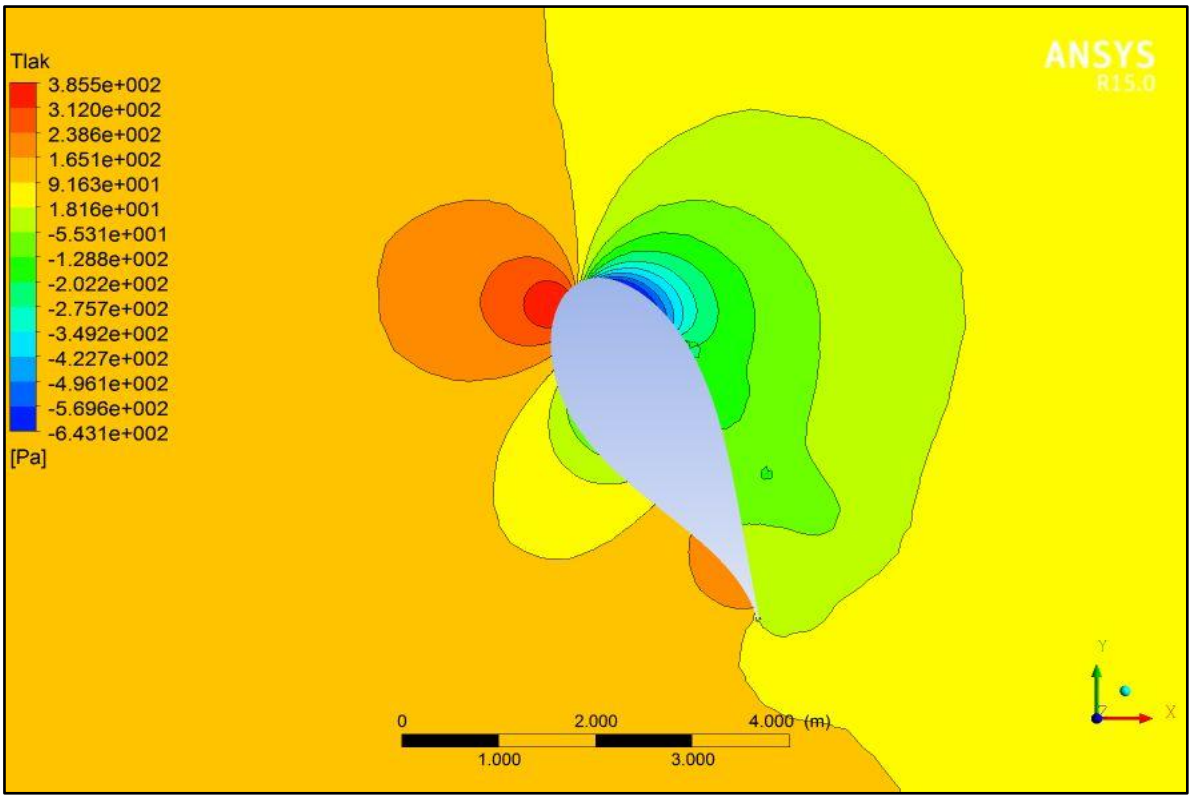
Raspodjelu totalnog tlaka po presjecima prikazuju slike 23-28. U tablici 2 su udaljenosti profila od korjena lopatice, odnosno osi vrtnje, duž pitch osi. Slike 23-28 su u ravninama koje su po z osi pomaknute za vrijednsti iz tablice 2.

Profil	Udaljenost od korjena lopatice [m]
DU40	7,6863
DU35	9,0153
DU30	12,6734
DU25	18,8087
DU21	26,6165
NA64618	36,078

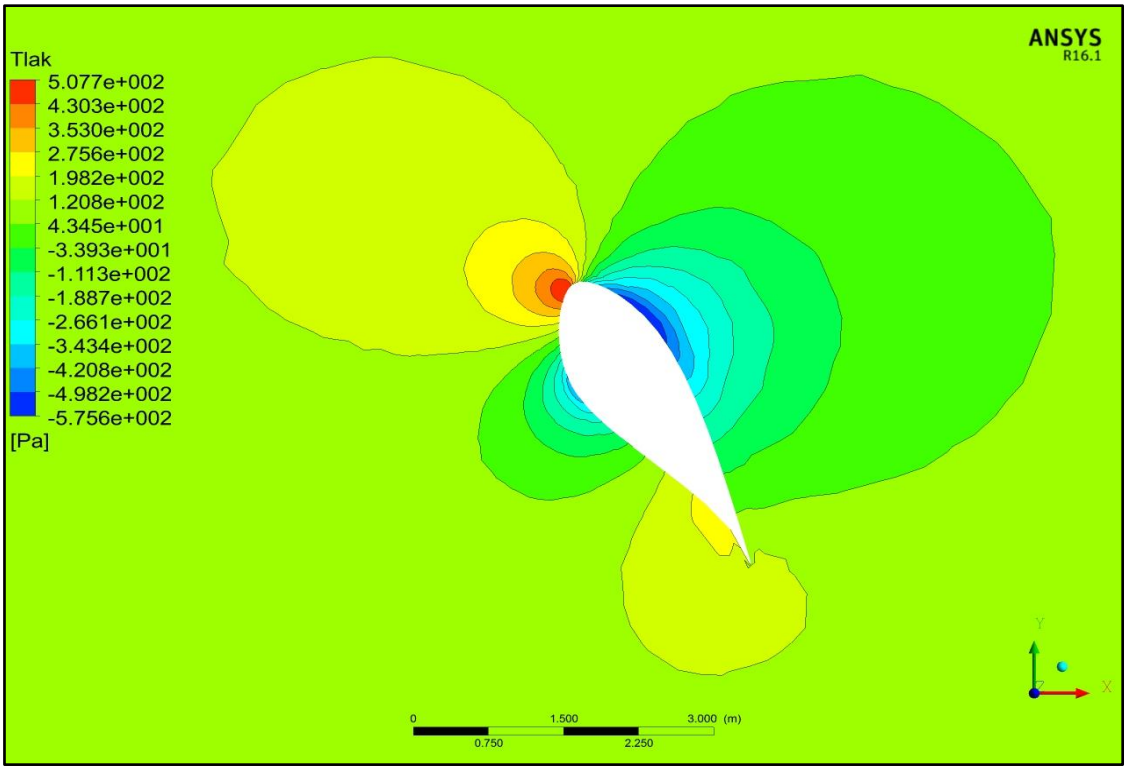
Tablica 2. Udaljenost profila od korjena lopatice



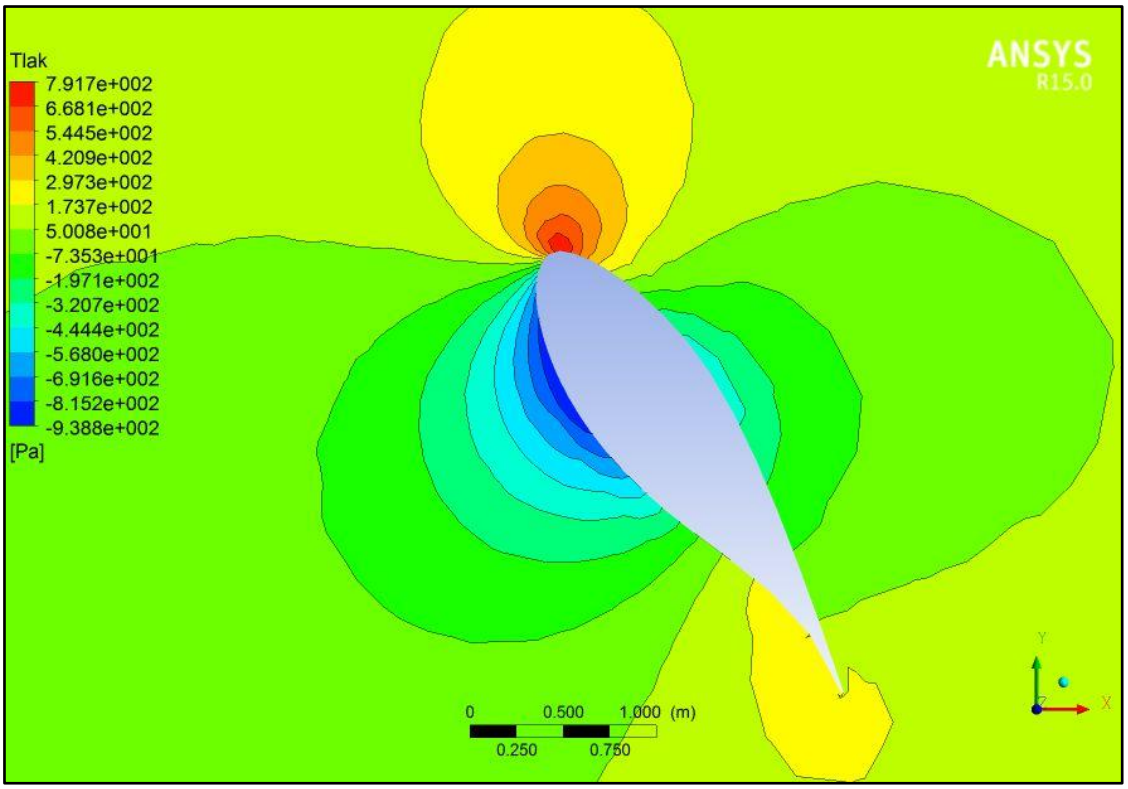
Slika 23. Raspodjela tlaka u presjeku profila DU40



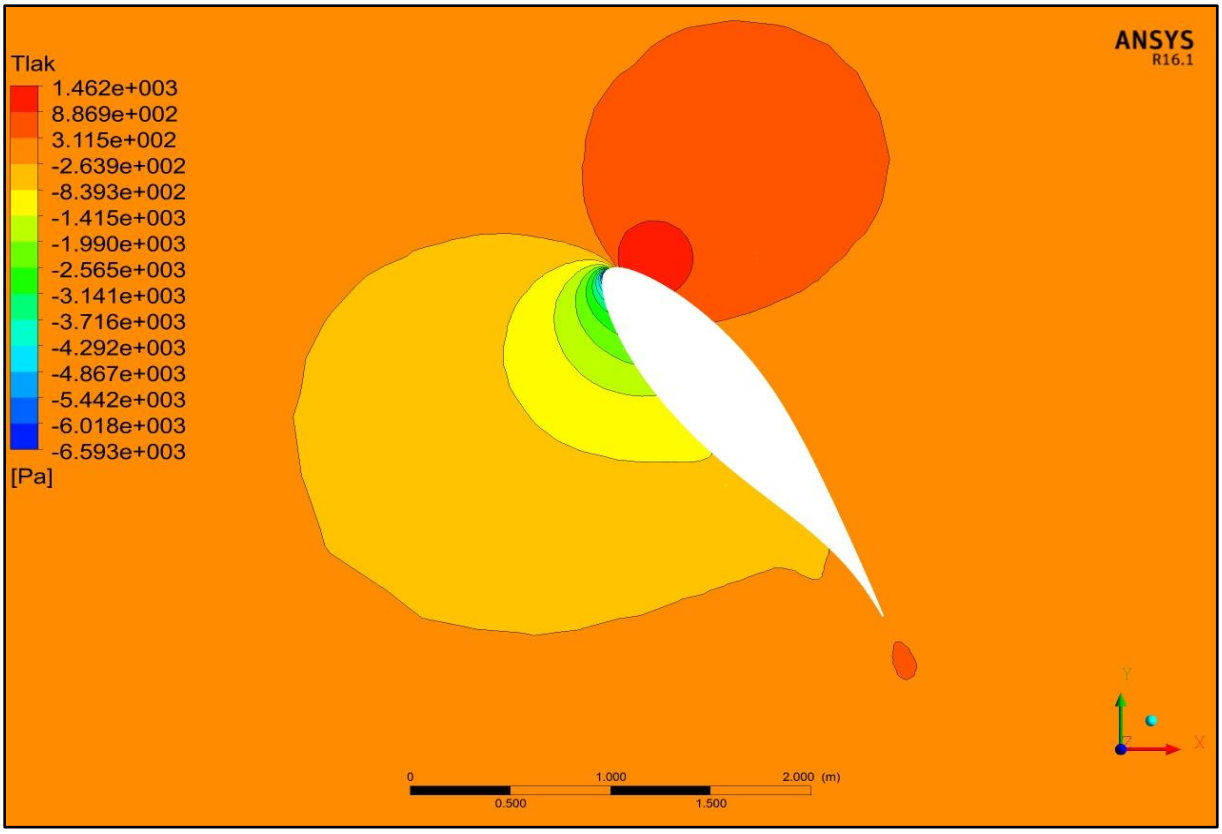
Slika 24. Raspodjela tlaka u presjeku profila DU35



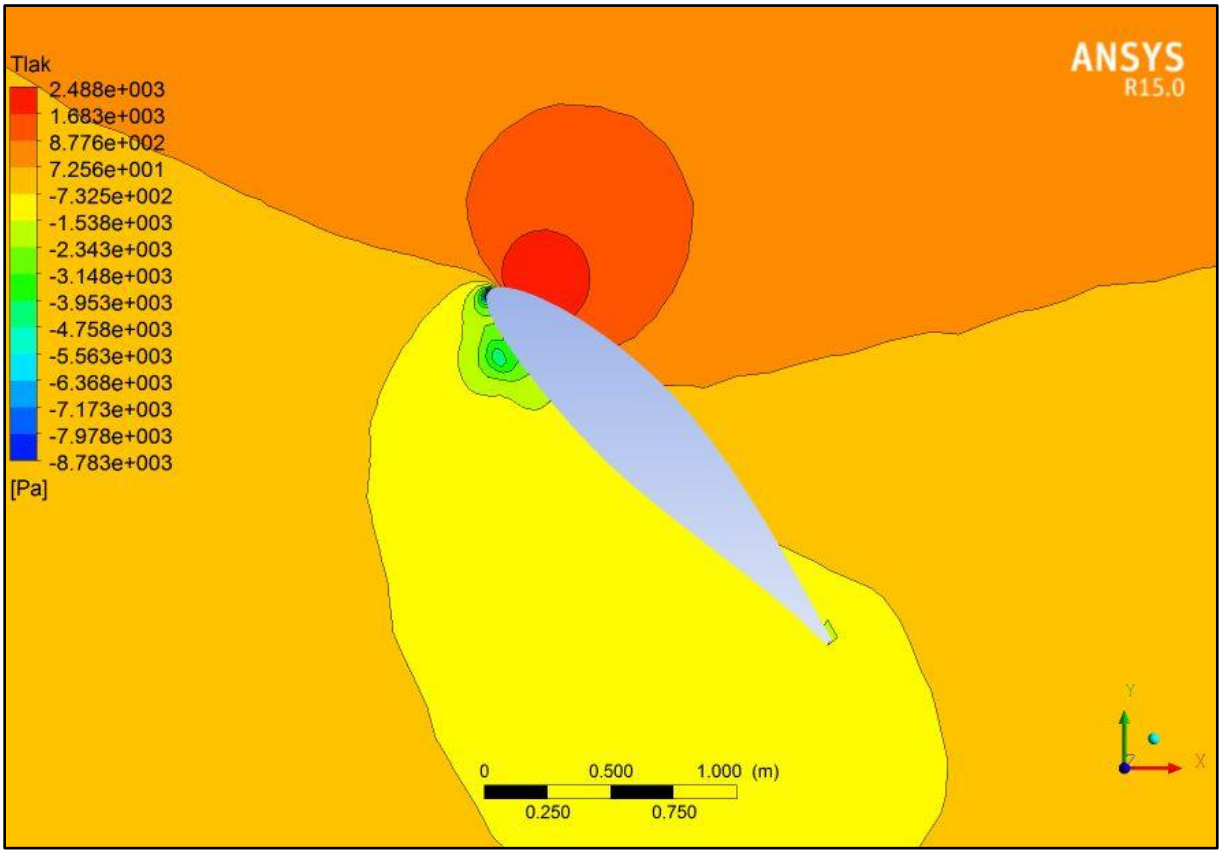
Slika 25. Raspodjela tlaka u presjeku profila DU30



Slika 26. Raspodjela tlaka u presjeku profila DU25

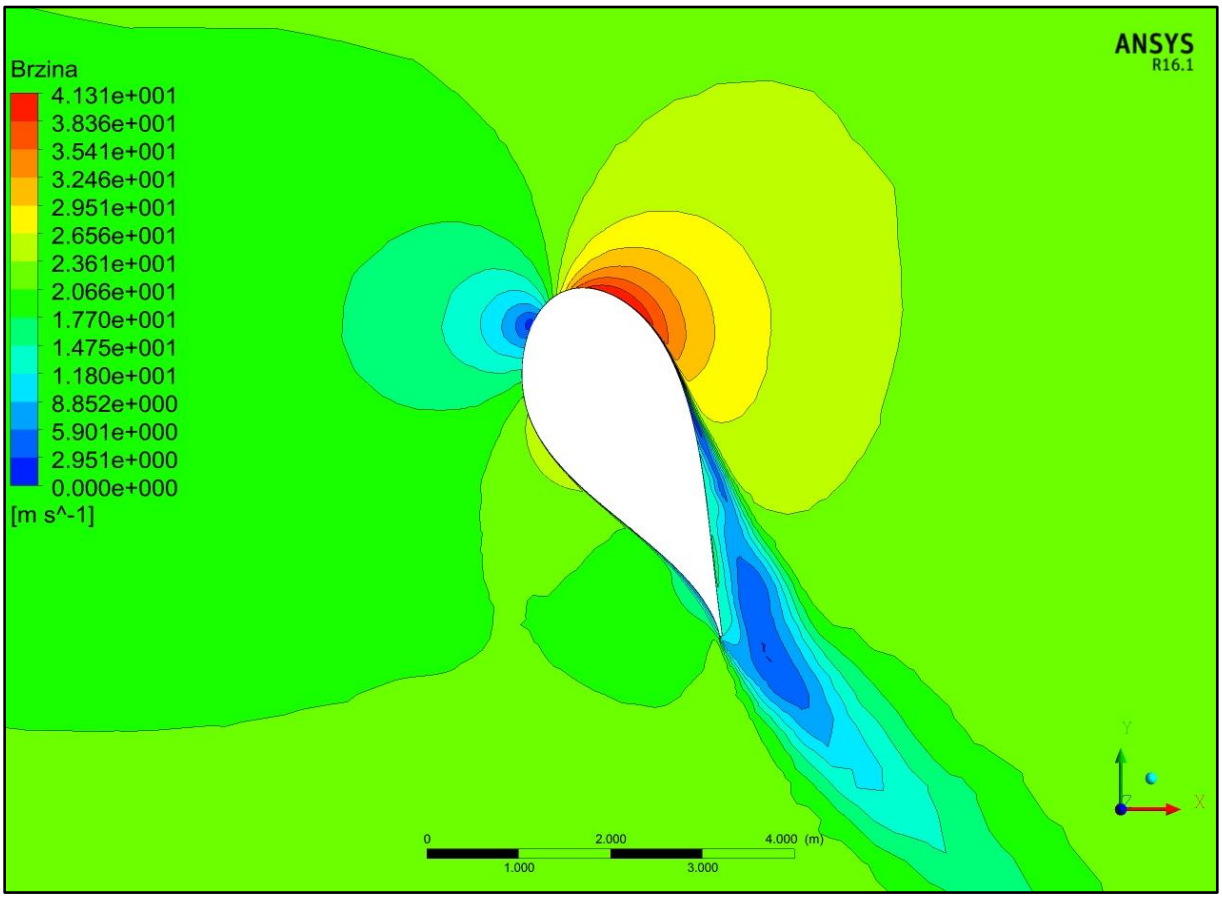


Slika 27. Raspodjela tlaka u presjeku profila DU21

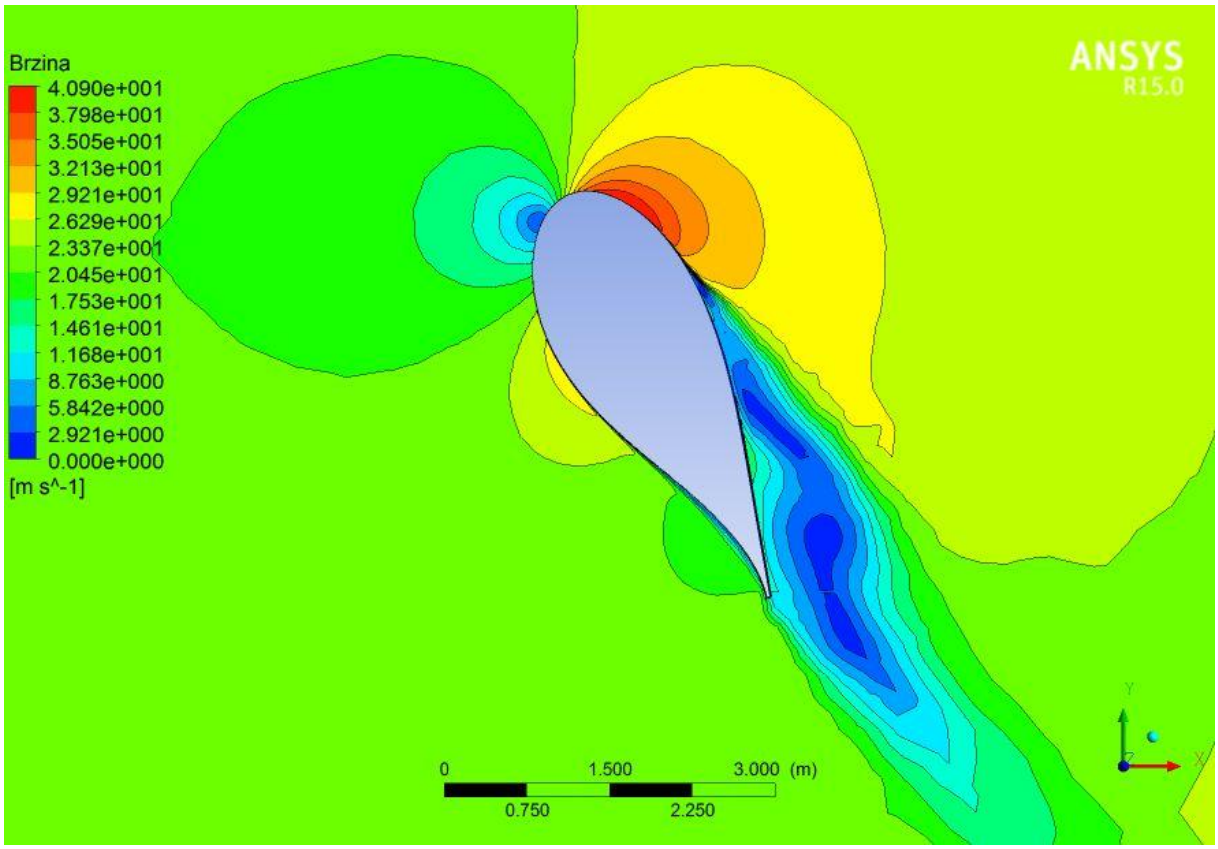


Slika 28. Raspodjela tlaka u presjeku profila NA64618

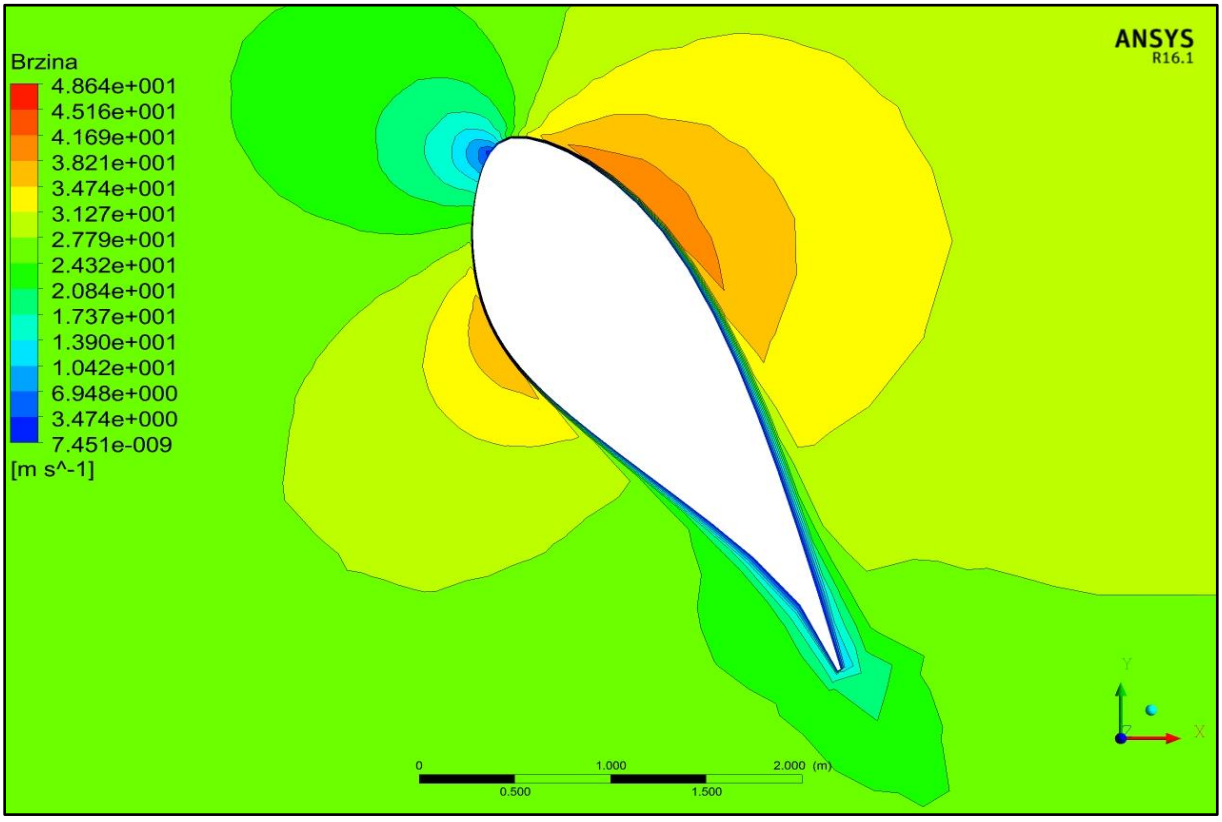
Raspodjela brzina u presjeku profila DU40, DU35, DU30, DU25, DU21 i NA64618 prikazuju slike 29-34.



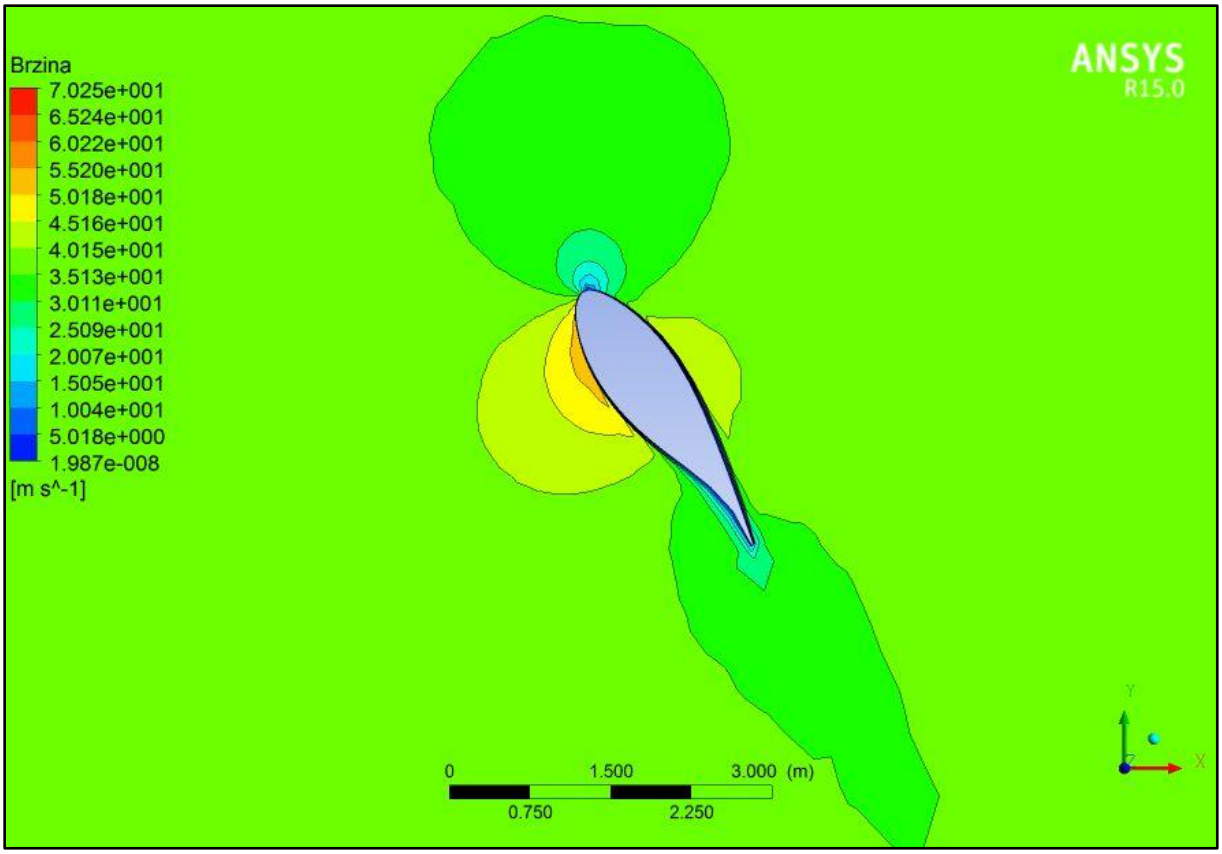
Slika 29. Raspodjela brzina u presjeku profila DU40



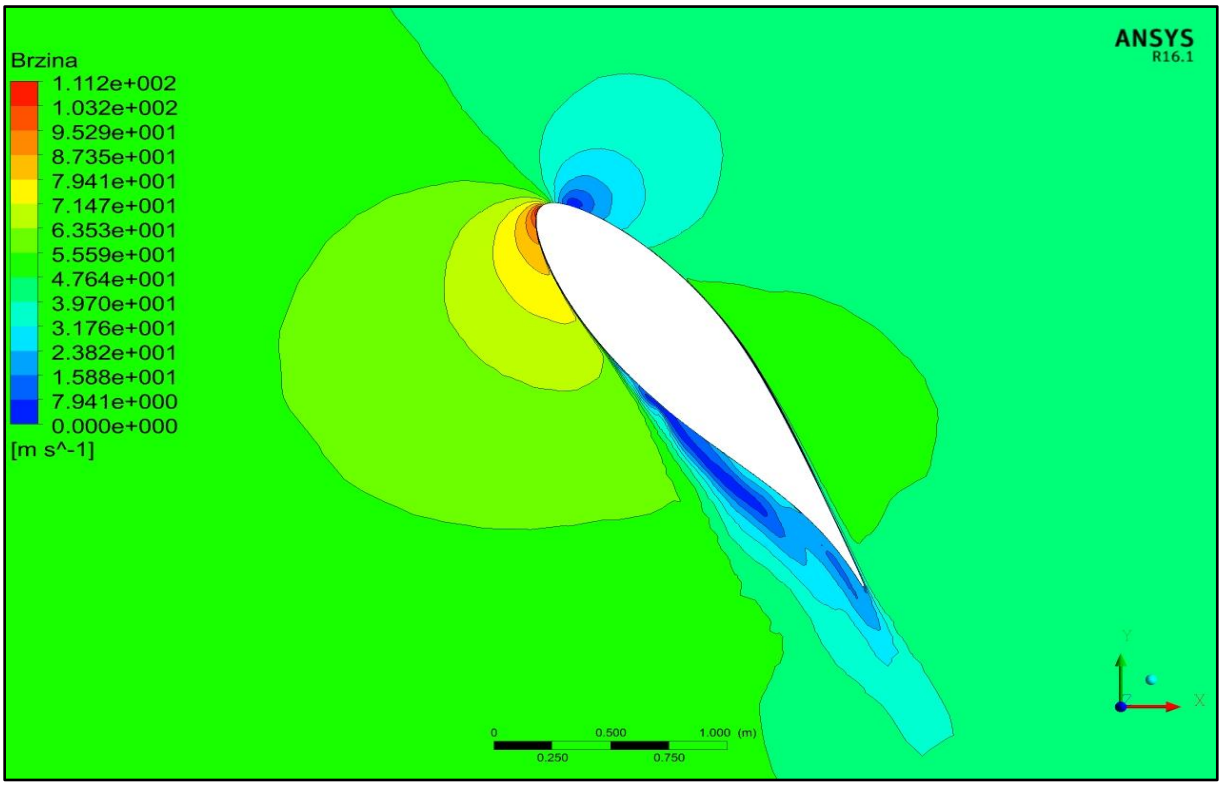
Slika 30. Raspodjela brzina u presjeku profila DU35



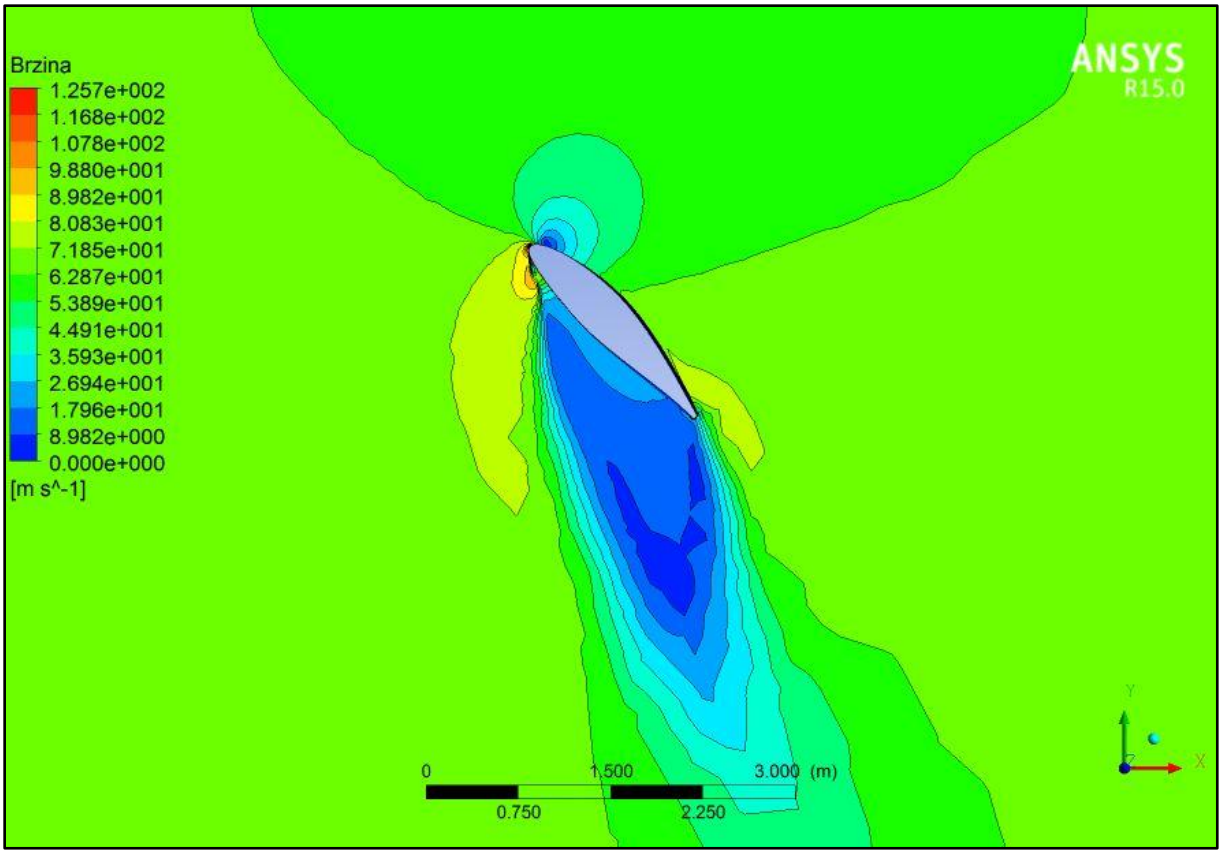
Slika 31. Raspodjela brzina u presjeku profila DU30



Slika 32. Raspodjela brzina u presjeku profila DU25

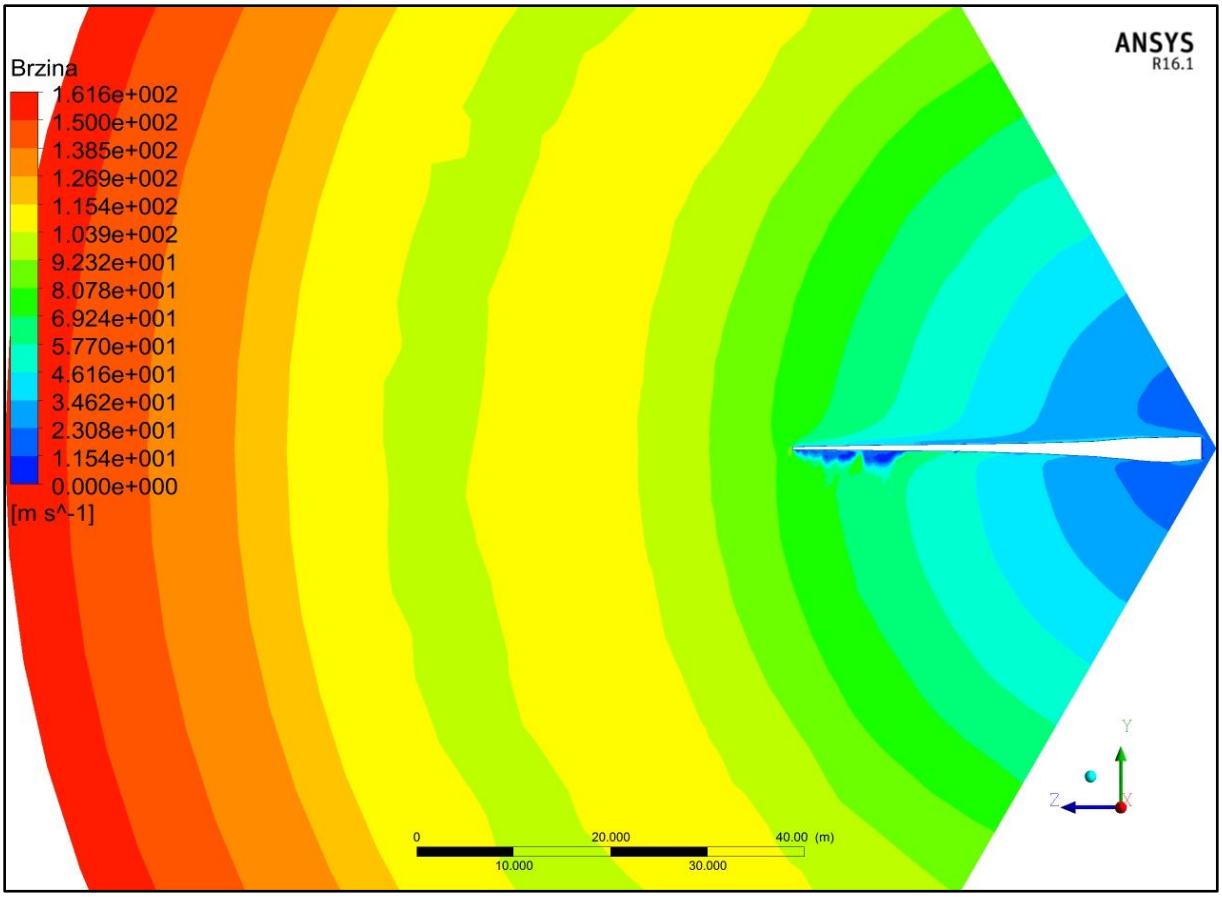


Slika 33. Raspodjela brzina u presjeku profila DU21

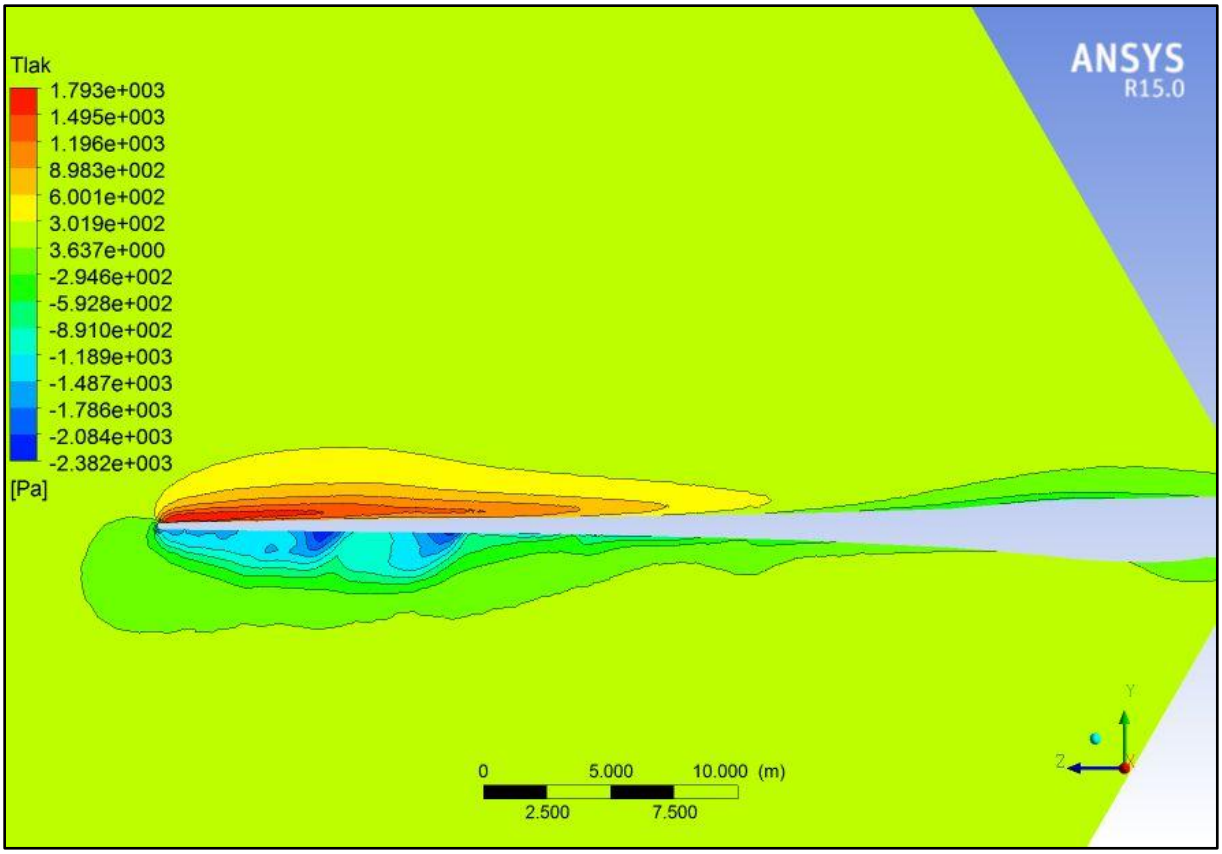


Slika 34. Raspodjela brzina u presjeku profila NA64618

Slika 35 prikazuje raspodjelu brzina u ravini zy duž pitch osi lopatice, dok slika 36 prikazuje raspodjelu tlaka u istoj ravnini.

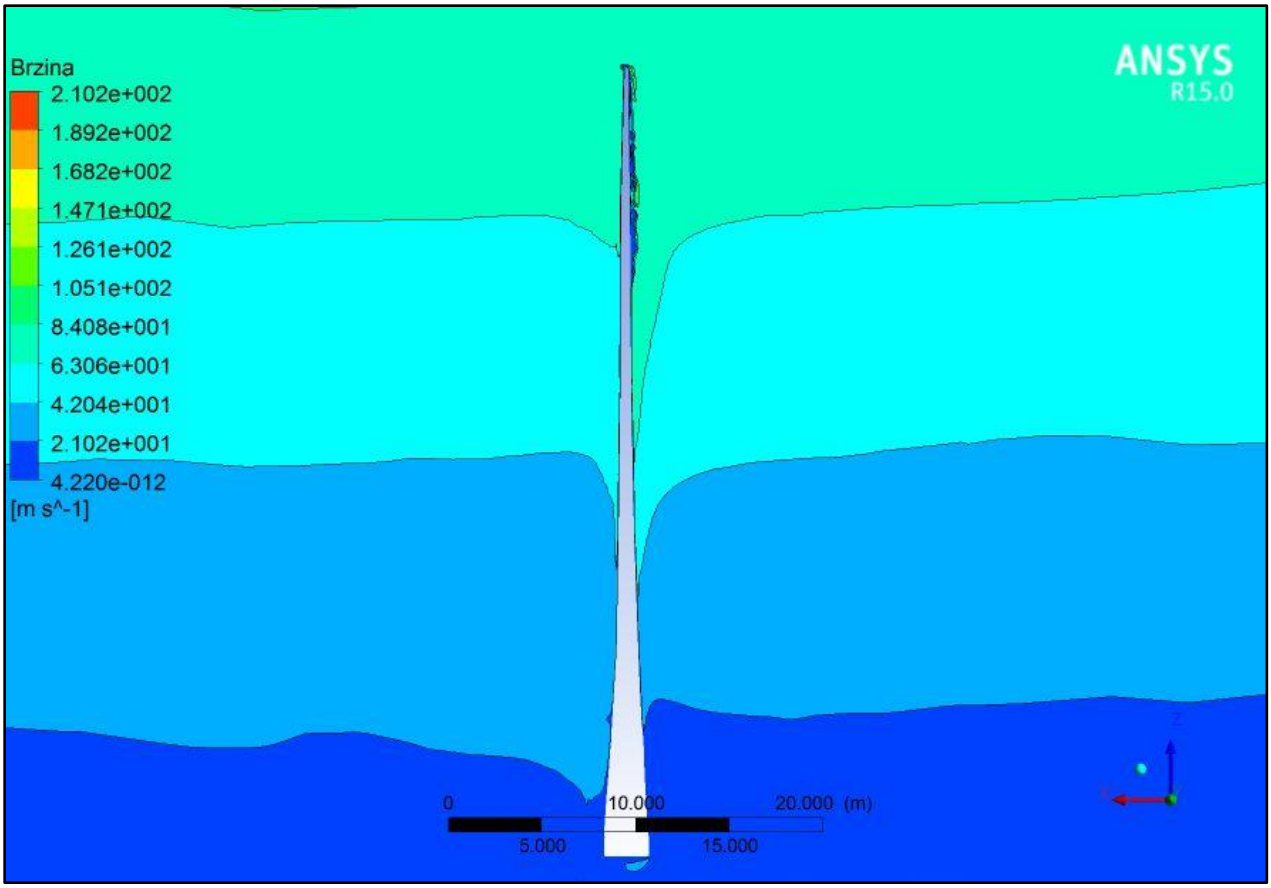


Slika 35. Raspodjela brzina u presjeku zy duž lopatice

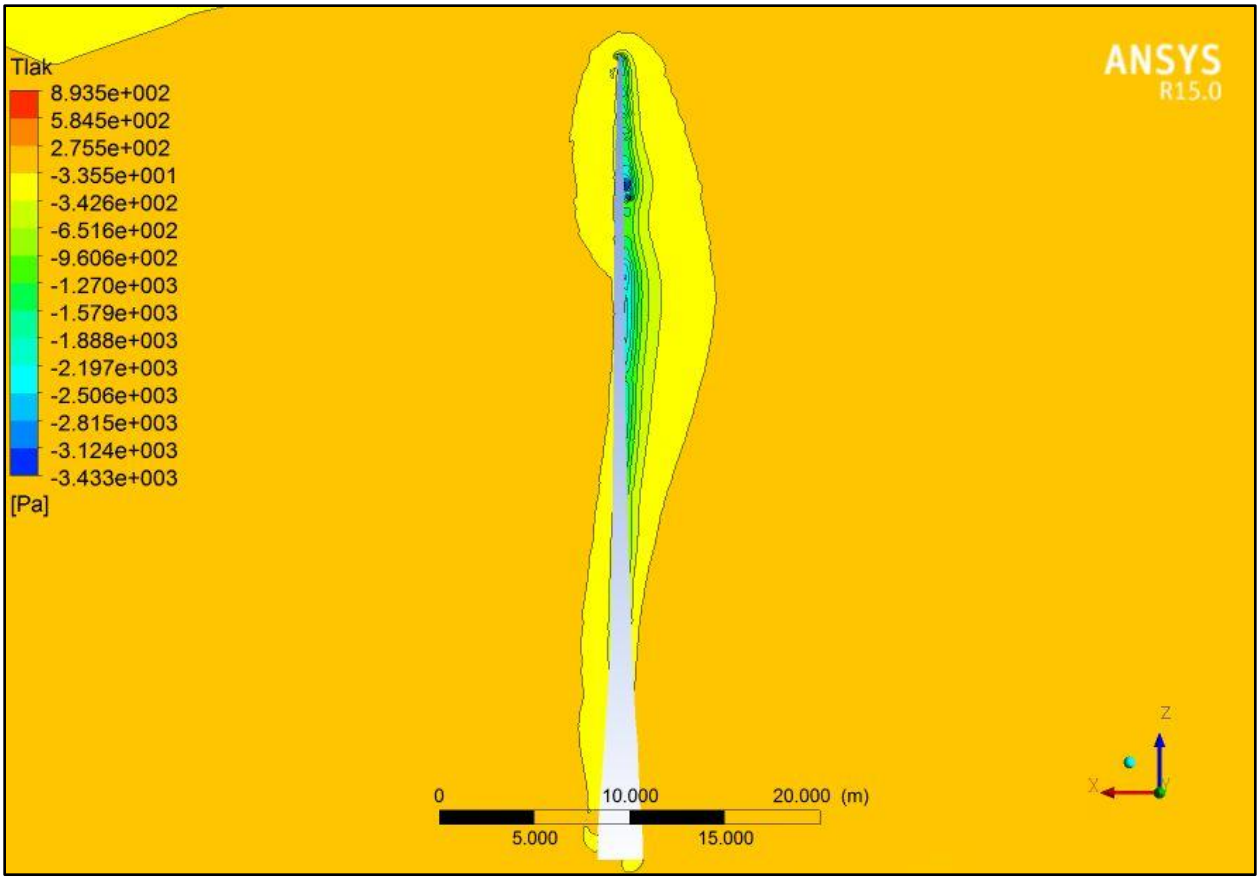


Slika 36. Raspodjela tlaka u presjeku zy duž lopatice

Raspodjelu brzina i tlaka u presjeku zx prikazuju slike 36 i 37.

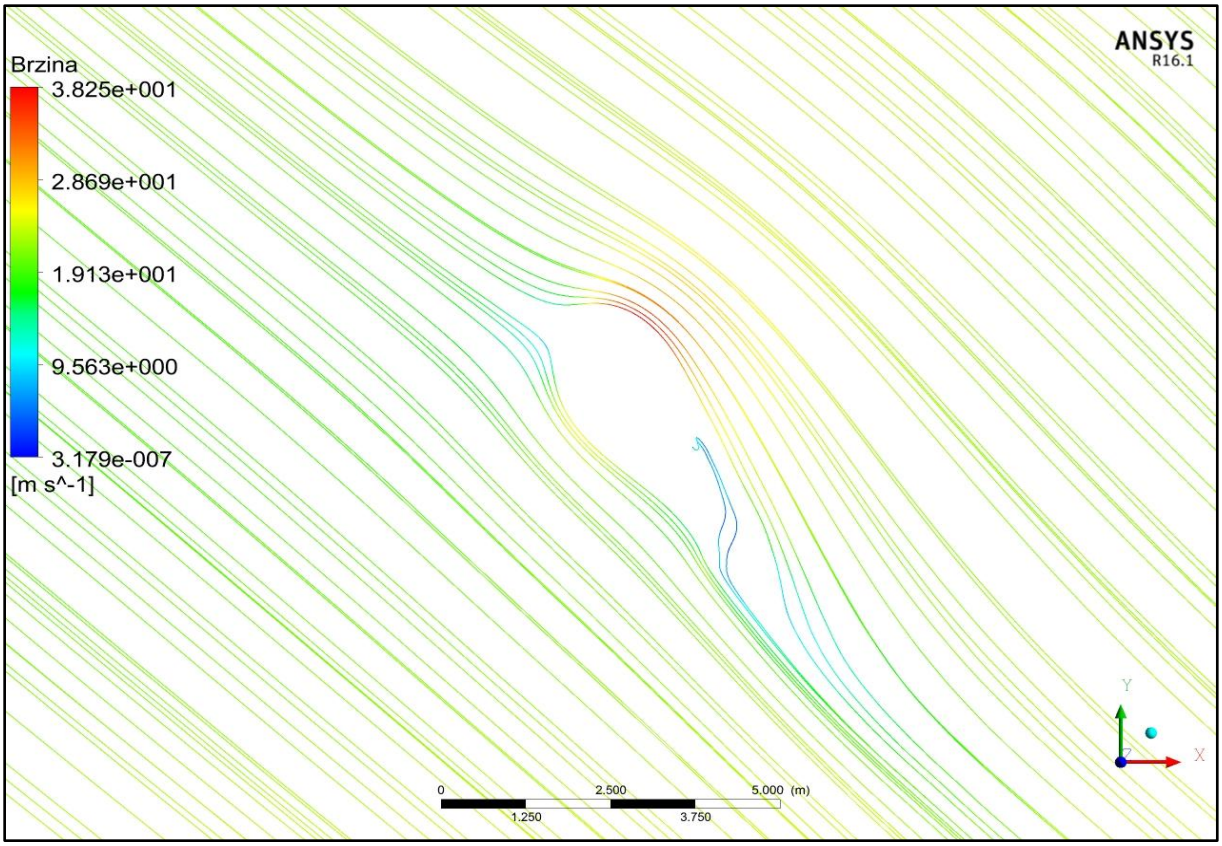


Slika 37. Raspodjela brzina u presjeku xz duž lopatice

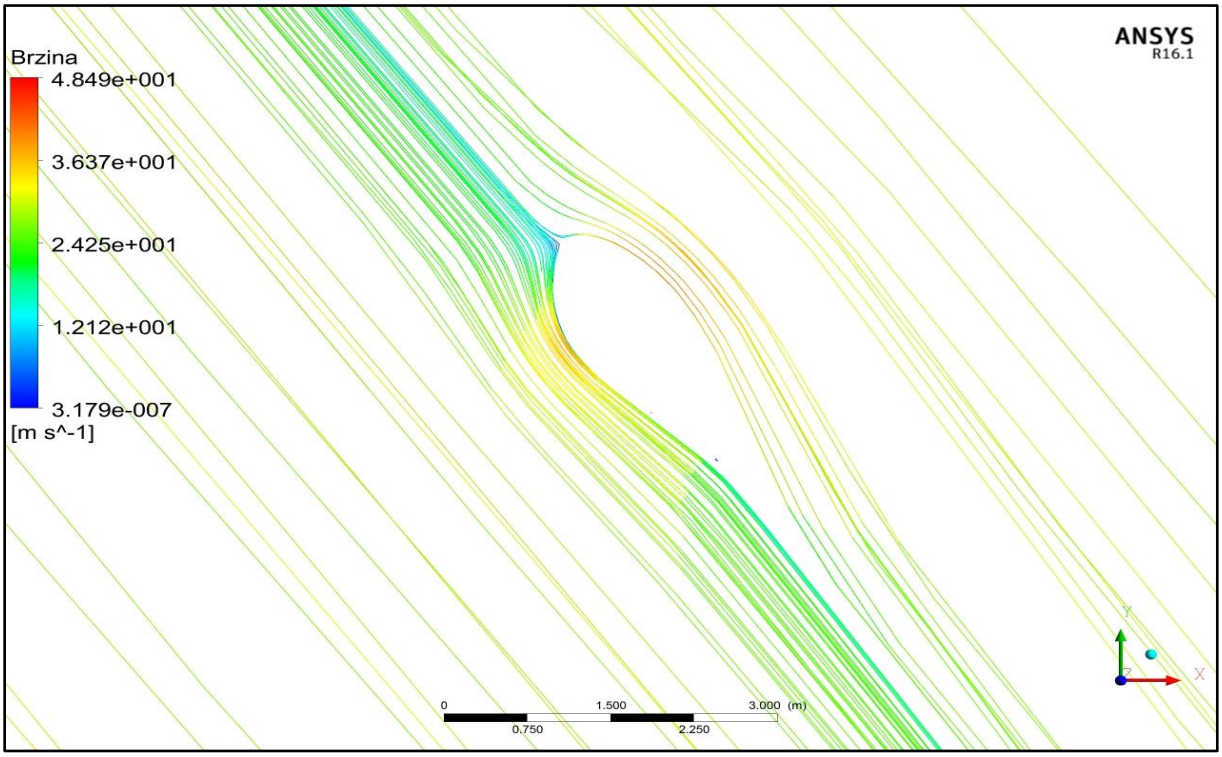


Slika 38. Raspodjela tlaka u presjeku xz duž lopatice

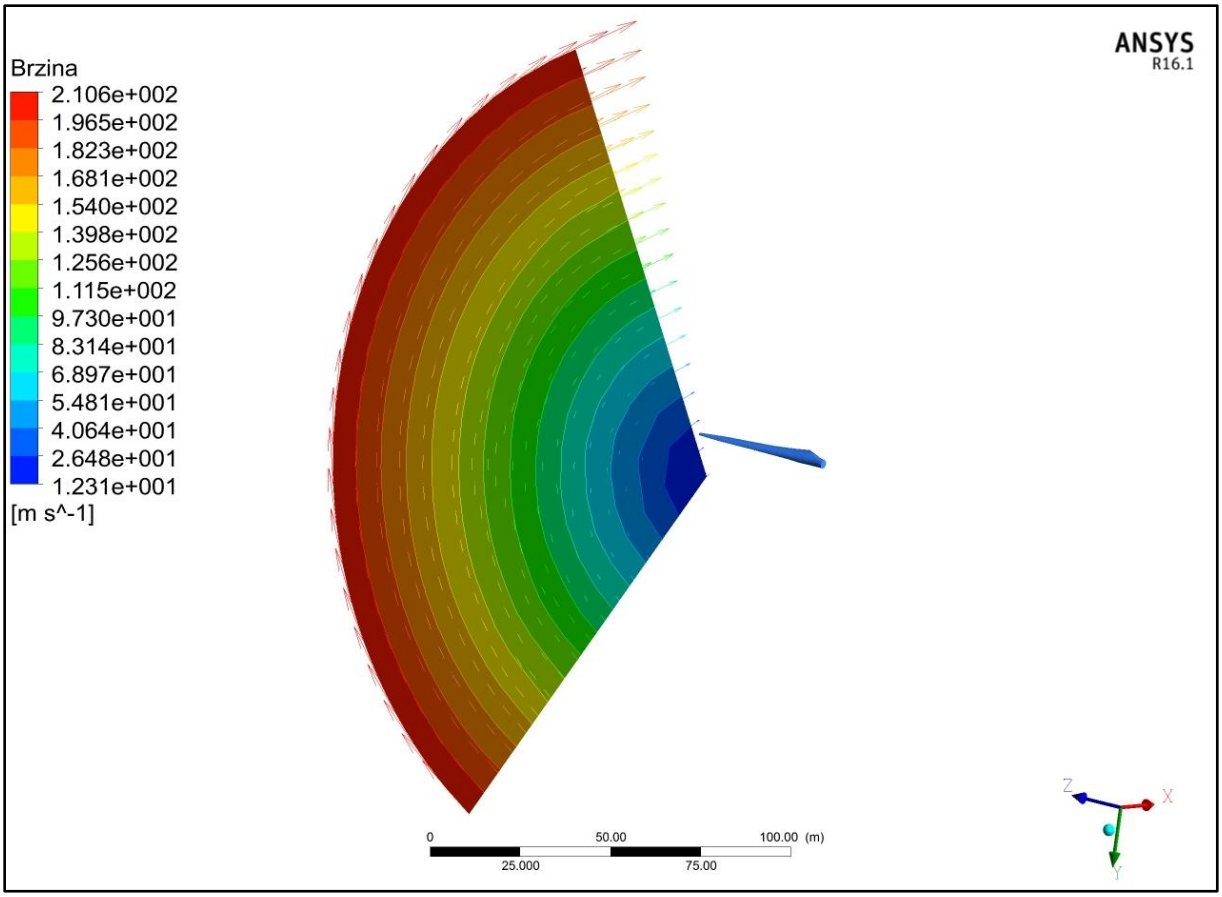
Raspodjela strujnica oko profila DU40 i DU30 prikazuju slike 39 i 40, dok slika 41 prikazuje raspodjelu brzina na rubnom uvjetu ulaz.



Slika 39. Raspodjela strujnica oko profila DU40



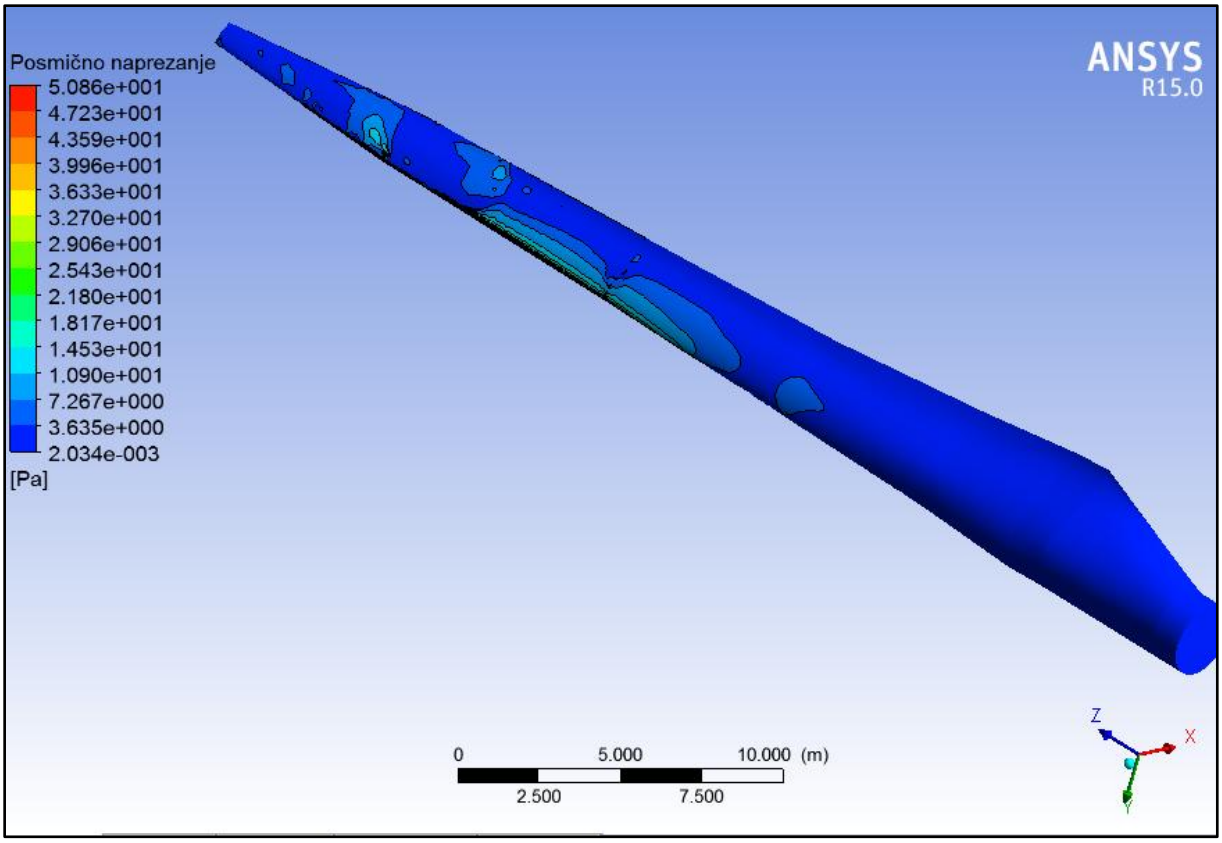
Slika 40. Raspodjela strujnica oko profila DU30



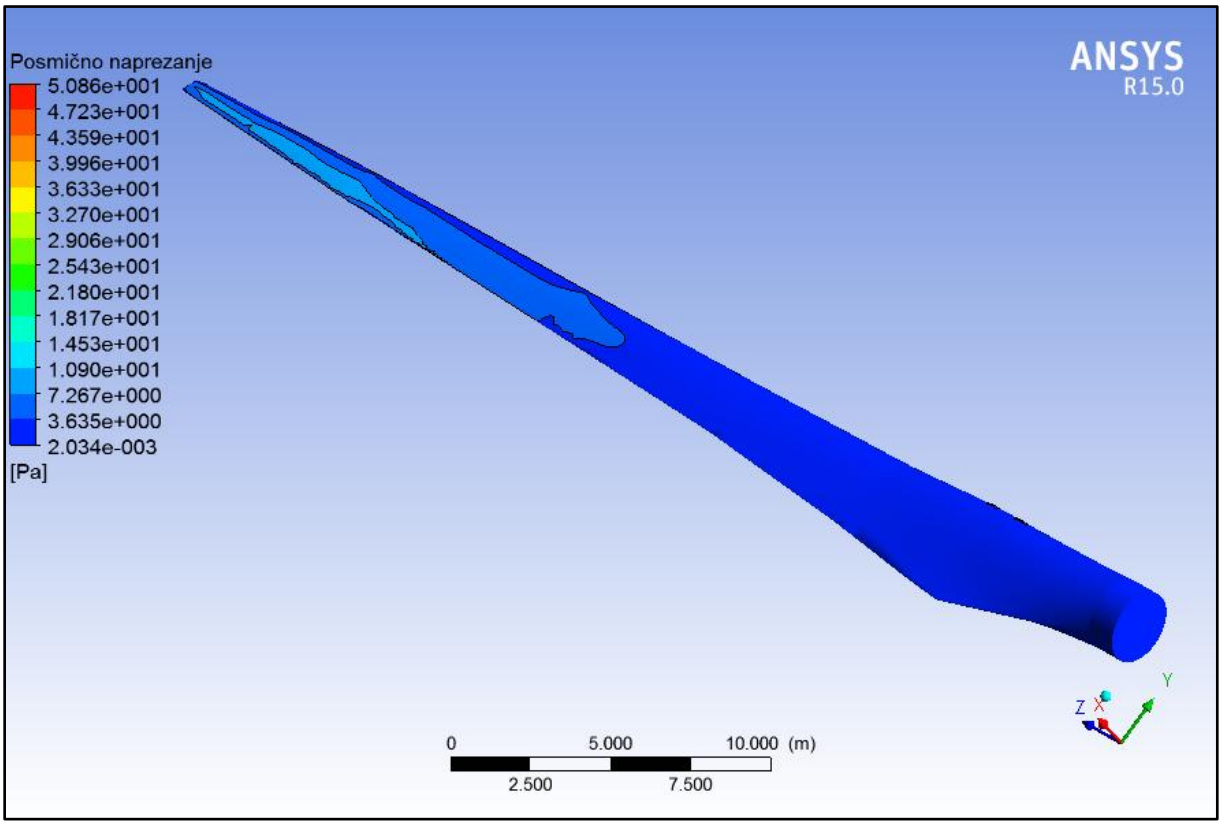
Slika 41. Raspodjela brzina na ulazu u domenu

Na slici 41 je vidljivo kako je model frame motion aktivan tokom simulacije te kako domena rotira oko osi x.

Slike 42 i 43 prikazuju raspored posmičnih naprezanja po obodu lopatice s različitim pogledom na lopaticu.



Slika 42. Raspored posmičnih naprezanja po obodu lopatice



Slika 43. Raspored posmičnih naprezanja po obodu lopatice

Kako je vidljivo na slikama 42 i 44 najveća naprezanja su u području od presjeka DU30 do DU21. Razlog tome je što na te profile fluid nastrujava pod napadnim kutevima koji se kreću oko 0^o. Na slikama 39 i 40 je također to vidljivo, strujnice prikazuju kako na profil DU30 fluid nastrujava praktički pod napadnim kutem od 0^o, što nije slučaj za profil DU40.

Na slikama 29-34 je također vidljivo kako pri opstrujavanju profila na kojima se javljaju najveća posmična naprezanja nema odvajanja fluida ili je ono jako malog intenziteta, što je uzrok malih napadnih kuteva.

7. Proračun snage

Proračun snage je proračunat pomoću dobivenog momenta oko osi rotacije u ovo slučaju osi x, i u ishodištu koordinatnog sustava. Sile su proračunate u smjerovima zadanih osi.

7.1. Proračun sila, momenata i snage

Pri nastrujavanju fluida na profil zbog viskoznosti i otpora oblika fluid na profil prenosi određenu silu. Sve sile koje se javljaju i smjerove njihovih vektora su opisane u poglavlju 4.2. U tablicama 3 i 4 su prikazani iznosi viskoznih i tlačnih komponenata sila i momenata koji djeluju na lopaticu.

	F_x	F_y	F_z
Tlačna komponenta [N]	-44010,393	-34615,478	816,63627
Viskozna komponenta [N]	207,17247	-381,90058	55,277992
Ukupno [N]	-43803,221	-34997,379	871,91426

Tablica 3. Iznosi komponenata sila koje djeluju na lopaticu

	M_x	M_y	M_z
Tlačna komponenta [Nm]	1289985,4	-1591208,6	21642,516
Viskozna komponenta [Nm]	9548,8224	4430,1194	-19,0454
Ukupno [Nm]	1299534,2	-1586778,5	21623,474

Tablica 4. Iznosi komponenata momenata koji djeluju na lopaticu

Ovdje treba naglasiti kako su ovo sile i momenti na jednu lopaticu, ukupna sila na cijeli rotor se dobije tako da se gornji rezultati pomnože s brojem lopaticu, u ovom slučaju to su tri puta veće sile i momenti. Tablica 5 prikazuje iznose ukupnih sila i momenata.

	$F_{x,uk}$, $M_{x,uk}$	$F_{y,uk}$, $M_{y,uk}$	$F_{z,uk}$, $M_{z,uk}$
Sila [N]	-131409,663	-104992,137	2615,7427
Moment [Nm]	3898602,6	-4760335,5	64870,422

Tablica 5. Ukupne sile i momenti na rotor

Proračun snage se dobiva jednadžbom

$$P = M_{x,uk} \cdot \omega = 6,532\,\text{MW} \tag{7.1}$$

gdje je ω kutna brzina lopatice korištena pri definiranju frame motion uvjeta u simulaciji.

7.2. Usporedba sa 2D rezultatima

2D rezultati su proračunati u završnom radu [1]. Dobiveni su podjelom lopatice na 6 parcijalnih strojeva, svaki parcijalni stroj odgovara jednom aeroprofilu. Za svaki parcijalni stroj su izračunate sile i momenti te je metodom interpolacije dobivena krivulja raspodjele sila i momenata duž lopatice. Iz dobivene krivulje je integralom dobivena snaga vjetroagregata. Postavke brzine vjetra i brzine rotacije te turbulencije su jednake za 2D i 3D simulaciju. Snaga 2D simulacije za pitch kut lopatice $51{,}84^{o}$ iznosi 7,35 MW, što je za 0.82 MW veća snaga.

Iako su rezultati 3D simulacije preveliki u usporedbi sa eksperimentalnim ispitivanjima i dalje daju realnije rezultate od 2D simulacija, zbog uzimanja u obzir više faktora pri izračunu.

Potrebno je također naglasiti usporedbu proračuna statičkom i transijentnom simulacijom. Na slikama 29, 30, 33 i 34 je vidljivo kako se pri opstrujavanju profila DU40, DU35, DU21 i NA64618 javljalo odvajanju strujanja što nije otežavalo konvergenciju rješenja u transijentnoj 3D simulaciji iako Courantov broj nije uzet u obzir. Dok je pri proračunu 2D modela korišten steady solver koji nije bio u mogućnosti konvergirati do željenih vrijednosti reziduala pri pojavi odvajanja strujanja.

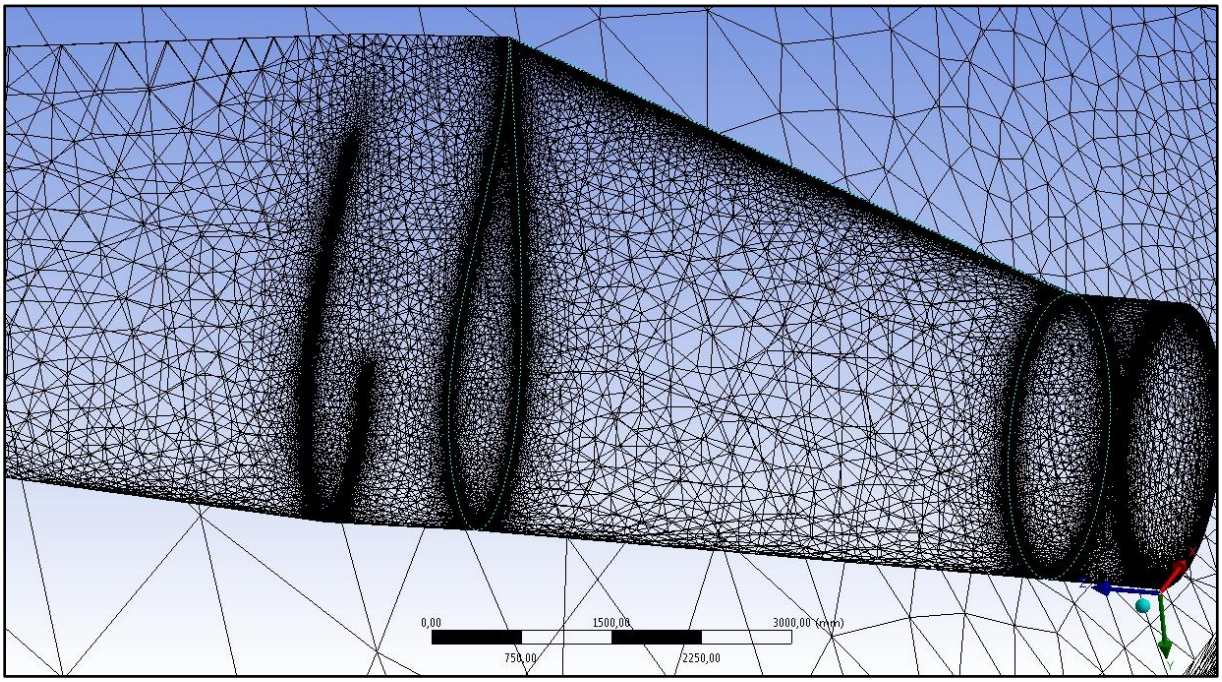
Razlika u broju konačnih volumena je također znatna. 2D rješenje je izračunato pri 620 konačnih volumena po obodu aeroprofila, dok je pri 3D simulaciji aeroprofil diskretiziran sa oko 100 konačnih volumena po obodu osnovnih 6 aeroprofila, a prostor po obodu lopatice između njih ima još grublju mrežu. Također pri 2D simulaciji je vođeno računa o y^{+} zidnim funkcijama koje u 2D modelu nisu uzete u obzir. Inflacija u 2D siulaciji je finija sa manjim tanjim prvim slojem i većem brojem slojeva. Dakle pri puno grubljoj mreži 3D simulacija je ipak dala realnije rezultate.

8. Diskusija i zaključak

Kao što je vidljivo iz jednadžbe (7.1) vrijednost snage, pa tako i momenata i sila koji uzrokuju tu snagu, su prevelike. Postoji puno uzroka toj razlici. Jedan od njih je greška proračuna koeficijenata uzgona i otpora pa tako i sila i momenata računalnim programima. Svi računalni programi proračunavaju veće vrijednosti koeficijenata zbog idealizacije problema.

Dodatna greška leži u modelu. Naime iz modela su izbačeni gondola i stup vjetroagregata koji također utječu na strujanje i razvijanje profila oko lopatice. Detaljniji model bi dao potpunije rezulatate, ali bi isto tako zahtjevao finiju mrežu sa više konačnih volumena pa tako i dulje vrijeme trajanja simulacije, i zahtjevnije računalo.

Greška je uvedena i diskretizacijom konačnim volumenima. Finija mreža bi dala bolje rezultate, ali bi isto tako, kako je već navedeno, bila puno zahtjevnija za izračun. Nadalje pri podešavanju postavki mreže za kreiranje mreže po lopatici je odabrana metoda edge sizeing što je rezultiralo finom mrežom u područjima aeroprofila zbog postojanja ruba, dok je u području između 2 uzastopna aeroprofila mreža puno rijeđa. Ovo se moglo ispraviti postavkom face sizeing, no za to je bi bilo potrebno postaviti jako male veličine površinskih elemenata što bi reultiralo jako gustom mrežom, pregustom za izračun na računalu bez klasterskih sposobnosti. Slika 44 prikazuje nejednoličnu veličinu površinskih elemenata duž lopatice.

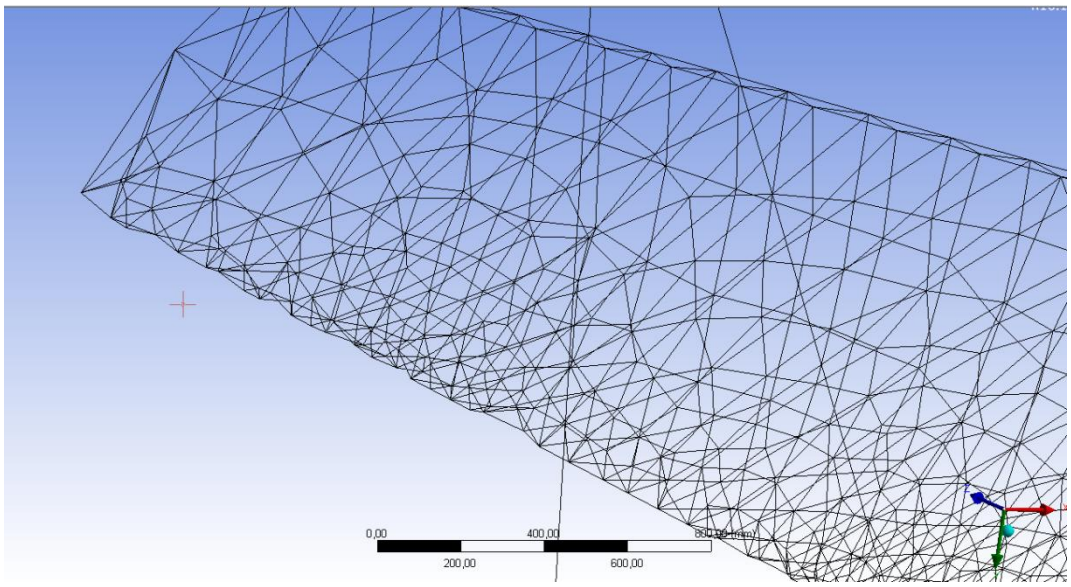


Slika 44. Nejednolika raspodjela elemenata duž lopatice

Pri kreiranju mreže relevance center koji definira kvalitetu kojom elementi opisuju zadanu geometriju je podešen na 0. Gdje je -100 loša podudaranost, ali zato je izračun brz, dok bi postavka relevancea na 100 rezultitala jako dobrom podudaranosti mreže sa geometrijom, ali

bi mreža bila jako gusta i zahtjevna za izračun. Dakle ovdje je isto uvedena greška u proračun jer geometrija lopatice nije potpuno definirana mrežom što je uvelo grešku.

Slika 45 prikazuje primjer lošeg opisa geometrije u vrhu lopatice gdje su profili jako malog chorda, thicknessa i oštrijim kutevima geometrije što je rezultiralo zahtjevnom geometrijom.



Slika 45. Opis geometrije lopatice konačnim volumenima

U obzir treba uzeti i primjenjene modele. Jednadžbe prostorne diskretizacije su ili prvog ili drugog reda, povećanjem reda jednadžbi rezultati bi bili točniji. Frame motion model bi u pravilu trebao dobro opisivati ovakav proračun, no sliding mesh ili dynamic mesh model sigurno bi poboljšao dobivene rezultate. Courantov broj kako je već naglašeno nije uzet u obzir što također unosi grešku iako je rješenje konvergiralo.

Iako su rezultati preveliki u usporedbi sa realnim, mogu se koristi za usporedbu pri modeliranju različitih napadnih kuteva, pitch kuteva te različitih brzina vjetra i rotacija rotora. Pri ovakvim usporedbama moglo bi se odrediti koji su najoptimalniji pitch kutevi kao i brzine vjetra i kutne brzine rotora.

9. Literatura

[1.] Išek, I.: Proračun snage vjetroagregata, Završni rad, Zagreb, 2014.

[2.] Menter, F. R., Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications, AIAA Journal 32 (8): 1598–1605, 1994.

[3.] Džijan, I.: Računalna dinamika fluida, podloge za predavanja, Zagreb, 2010.

[4.] Mehanika fluida II- što valja zapamtiti, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb

[5.] Fluent 6.3 Tutorial Guide, Fluent Inc., Centerra Ressourse Park, 2006.

[6.] Gambit modeling guide, Fluent Inc., Centerra Resourse Park, 2007.