



Univerza v Mariboru

Fakulteta za strojništvo

Magistrsko delo

NAPOVED KARAKTERISTIK VETRNE TURBINE

Študent:	Gregor ČREŠNIK
Študijski program	
2. stopnje:	Strojništvo
Smer:	Energetsko, procesno in okoljsko strojništvo
Mentor:	red. prof. dr. Aleš HRIBERNIK
Somentor:	asist. dr. Matej ZADRAVEC

Maribor, december 2013

Vložena kopija sklepa o
potrjeni temi diplomskega dela

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju red. prof. dr. Alešu Hribniku in somentorju asist. dr. Mateju Zdravcu za pomoč in vodenje pri opravljanju magistrskega dela. Zahvaljujem se tudi _____.

Posebna zahvala velja staršem, ki so mi omogočili študij.

KAZALO

1	UVOD	1
1.1	KAJ JE VETRNA ELEKTRARNA	1
1.2	VRSTE VETRNH TURBIN:	2
1.3	VPLIV NA OKOLJE	4
1.4	VRSTE VETROV	4
1.5	VETRNE ELEKTRARNE V SVETU, V SLOVENIJI	6
1.6	POMEMBNI PARAMETRI ZA IZRAČUN.....	7
2	TEORETIČNE OSNOVE RAČUNALNIŠKE DINAMIKE TEKOČIN.....	12
2.1	ENAČBE ZAKONOV OHRANITVE	13
2.2	TURBULENTNI TOK	16
2.3	NUMERIČNA DISKRETIZACIJA	17
3	NUMERIČNI PRERAČUN VETRNE TURBINE.....	18
3.1	GEOMETRIJA VETRNE TURBINE:.....	18
3.2	RAČUNSKA MREŽA MODELA VETRNE TURBINE	20
3.3	NUMERIČNI MODEL.....	22
4	REZULTATI IN ANALIZA.....	24
4.1	HITROSTNO POLJE.....	24
4.2	TOKOVNICE PRI VSTOPNI HITROSTI VETRA 7 M/S IN 11 M/S IN PRI VRTILNI FREKVENCI 120 VRT/MIN.....	29
4.3	SILE NA LOPATICI	31
4.4	STRIŽNE NAPETOSTI NA LOPATICI ZARADI VISKOZNEGA TRENJA.....	32
4.5	VRTINČNOST.....	33
4.6	TLAK	36
4.7	IZRAČUN KARAKTERISTIK.....	37
	• Vrtilna frekvenca 100 vrt/min	37
	• Vrtilna frekvenca 120 vrt/min	39
	• Primerjava rezultatov pri obeh vrtilnih frekvencah	41
5	SKLEP	43
	SEZNAM UPORABLJENIH VIROV	44

NAPOVED KARAKTERISTIK VETRNE TURBINE

Ključne besede: obnovljivi viri, energija, veter, turbina, moč, navor, izkoristek, hitrost, numerična simulacija

UDK: 621.548.7:620.92(043.2)

POVZETEK

V današnjem času je skrb za čisto okolje bistvenega pomena večine držav razvitega sveta. Zelo pomembno vlogo pri tem imajo tudi obnovljivi viri energije, kamor sodijo lesna biomasa, vodna energija, sonce in veter.

Sam sem se osredotočil na vetrno energijo-kinetično energijo vetra, ki jo s vetrnimi turbinami pretvarjamo v mehansko energijo in nadalje s vetrnimi elektrarnami v električno energijo. S programskim paketom Ansys CFX 14.5 sem napravil simulacijo poenostavljene vetrne turbine s horizontalno osjo pri različnih hitrostih vetra. Simulacijo sem napravil pri dveh različnih vrtilnih frekvencah, zanimal me je navor, moč in izkoristek c_p .

Na osnovi dobljenih rezultatov lahko sklepamo, da prihaja pri različnih hitrostih vetra in pri različnih vrtilnih frekvencah do različnih rezultatov in da moč s hitrostjo narašča.

WIND TURBINE CHARACTERISTICS PREDICTION

Key words: renewable sources, energy, wind, turbine, torque, efficient, speed, numerical simulation

UDK: 621.548.7:620.92(043.2)

ABSTRACT

In present time clean environment is the number one issue for the most of developed countries in the world. Renewable energy sources which are wood, water energy, sun and wind energy play very important role in the process of environmental care. My work is focused on wind energy-kinetic energy of the wind. We use wind turbines to transform wind energy into mechanic energy and later with wind plant into electric energy. With program Ansys CFX 14.5 I made a simulation of a simple wind turbine with horizontal axes at different wind speed. I made a simulation of two various frequencies, I was interested in torque, power and efficient. Based on the results we come to a conclusion, that at various wind speed and frequencies the results are different and that the power with speed increases.

UPORABLJENI SIMBOLI

Latinski simboli

A – površina [m^2]

V - volumen [m^3]

n - vrtilna hitrost rotorja [vrt/min]

P – moč [W]

r - polmer [m]

D – premer [m]

Re - Reynolds-ovo število

v - hitrost [m/s]

v_o - hitrost vetra za turbino [m/s]

P_o - mehanska moč [W]

P_{θ} - specifična moč na enoto površine [W/m^2]

P_g - moč na gredi [W]

F - sila [N]

T -navor [Nm]

c_p - faktor izkoristka

v' - srednja hitrost zraka [m/s]

Grški simboli

ε - nastavni kot lopatic [°]

η_{\max} - teoretični izkoristek

ω - vrtilna frekvenca [vrt/min]

π - število 3,14

μ - dinamična viskoznost [Pa s]

ν - kinematična viskoznost [m²/s]

ρ – gostota [kg³/m]

UPORABLJENE KRATICE

CAD -	Computer Aided Design
FS -	Fakulteta za strojništvo
MKE -	Metoda končnih elementov
MKV -	Metoda končnih volumnov
HAWT -	Vetrna turbina z horizontalno osjo
VAWT -	Vetrna turbina z vertikalno osjo

1 UVOD

Svet se je v zadnjih desetletjih zelo spremenil, življenjski standard se je izboljšal, gospodarstvo se je vseskozi razvijalo in s tem se je povečevala tudi potreba po električni energiji. Na svetu prevladujejo standardne oblike pridobivanja električne energije, kot so jedrske elektrarne, termo elektrarne... Vedno večji delež imajo tudi obnovljivi viri energije, kamor spadajo sončna energija-sevalna energija, biomasa-kemična energija, geotermalna energija, energija oceanov-biobivalica in vetrna energija-kinetična energija. Seveda si sveta v takšni obliki, kot je danes, brez konvencionalnih virov ne moremo predstavljati, ampak tudi alternativni viri postajajo vse pomembnejši.

1.1 Kaj je vetrna elektrarna

Vetrna elektrarna je energetska objekt, ki pretvarja kinetično energijo vetra v električno energijo. Za obratovanje potrebuje primerno hitrost vetra in sicer pri hitrostih pod 4 m/s vetrnica ne obratuje zaradi nerentabilnosti in pri hitrostih nad 25 m/s vetrnica ne obratuje zaradi konstrukcijskih omejitev-možnost poškodb. Torej vklopna hitrost vetrne elektrarne znaša 4 m/s in izklopna hitrost 25 m/s. Največje moči nastajajo pri hitrostih 15 m/s.

Zgradba vetrne turbine:

- **rotor** (oblika je podobna letalskim krilom in helikopterskim propelerjem, premeri segajo tudi do 120 m, najpogostejše izvedbe so tri krake izvedbe rotorjev, zelo pomembna lastnost rotorjev je oblika profila)
- **okrov z reduktorjem, generatorjem in krmilnim sistemom** (vsebuje zobniški multiplikator, ki poveča vrtilno frekvenco rotorja na primerno vrtilno frekvenco generatorja, zavoro za zaustavitev v primeru neustreznega vetra, ter krmilni sistem za nastavitev kota natoka)
- **stolp s temeljem** (mora prenesti obremenitve, upogib, ki je posledica aksialne sile)

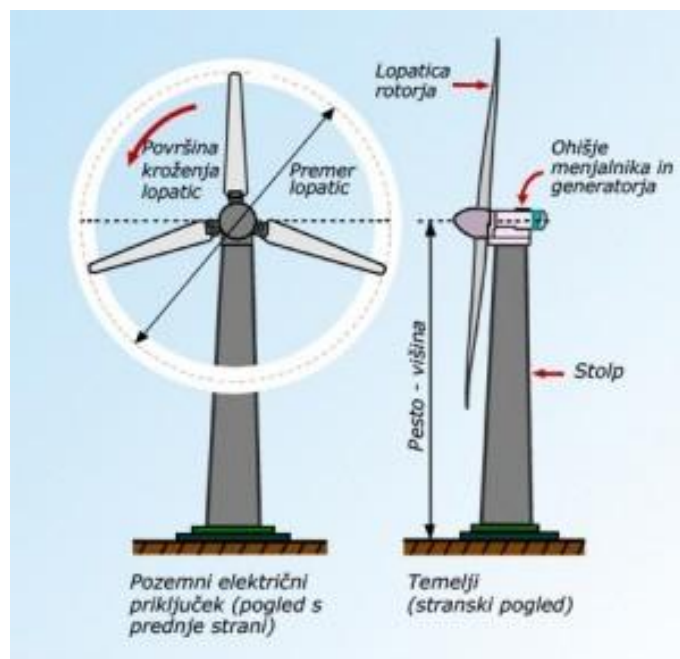
1.2 Vrste vetrnih turbin:

- glede na postavitev osi ločimo vetrne turbine z vertikalno osjo (Savoniusov, Darrieusov...) in vetrne turbine z horizontalno osjo (slika 1.1) (propelerski eno, dvo in tri lopatičen, več lopatičen...),
- glede na princip delovanja aerodinamične sile vetra na lopatice rotorja ločimo elektrarne, ki delujejo na principu sile dviga in na principu zračnega upora,
- glede na hitrost vrtenja imamo vetrnice s konstantno in s spremenljivo hitrostjo vrtenja.

V današnjem času je najpogostejša trikraka vetrnica s horizontalno osjo.

Vetrne elektrarne spadajo med obnovljive vire energije, vendar imajo kar nekaj slabosti:

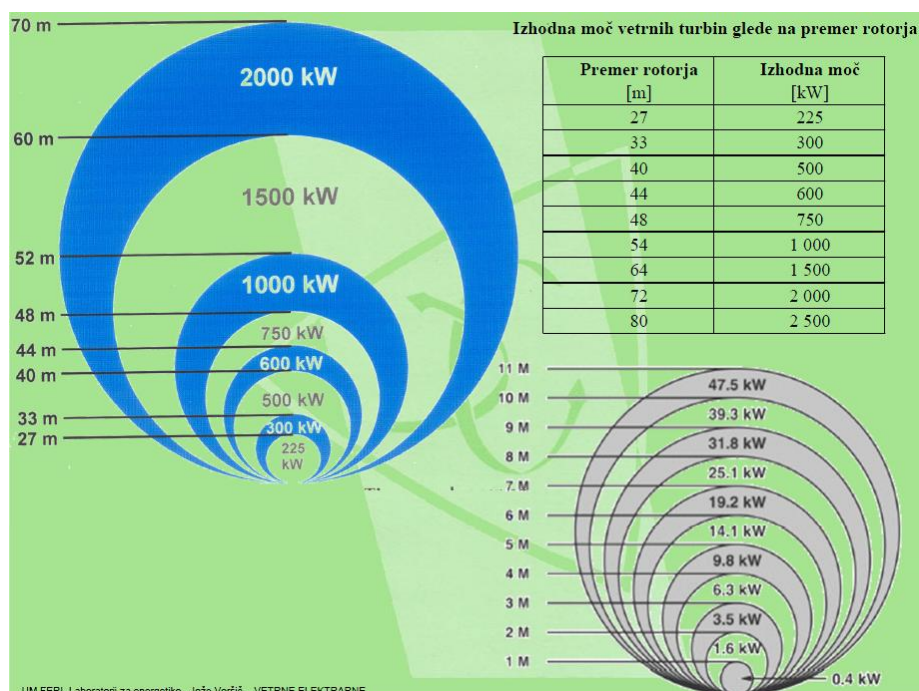
- za svoje delovanje potrebujejo veliko prostora,
- delež proizvedene električne energije je relativno majhen v primerjavi z deležem, ki ga je moč pridobiti iz drugih virov npr. fosilnih goriv,
- zaradi hrupa povzročajo sindrom vetrnic ,
- motijo tok svetlobe,
- za svoje hlajenje potrebujejo veliko sintetičnega olja, v primeru poškodb možnost razlitja, onesnaženost.



Slika 1.1: Horizontalna trikraka vetrna turbina [4]

Moč vetrne elektrarne:

Slika 1.2 prikazuje razmerje med premerom rotorja in izhodno močjo, ki jo dobimo iz vetrnice. Vidimo, da se moč s večanjem premera povečuje, kar je razumljivo. Enačba za moč pravi, da površina neposredno vpliva na moč.



Slika 1.2: Izhodna moč glede na premer rotorja [9]

1.3 Vpliv na okolje

Vetrna elektrarna vpliva na okolje tako pozitivno, kakor negativno.

Če začnem s pozitivnimi vplivi, je na prvem mestu količina CO₂, ki je v primerjavi z ostalimi elektrarnami na fosilna goriva manjša, kot naslednji je dolga življenjska doba, ki je 25 let, nato relativno preprosta transformacija vetrne energije v električno, vetrna energija je obnovljiv vir energije in tako zmanjša potrebo po primarni energiji.

K negativnim vplivom lahko uvrstimo majhen delež energije, ki jo lahko proizvede, za svoje delovanje potrebuje veliko prostora, so nevarne za leteče živali, ker se lahko le-te zaletijo v turbino, za svoje delovanje-hlajenje potrebujejo veliko sintetičnega olja (200-370 litrov), ker pa vetrne elektrarne ne stojijo same, je potencialna nevarnost onesnaženja zelo velika, zato jih ne postavljajo na vodovarstvenih območjih, nekatere so ponoči osvetljene, kar moti okolico, niso popolnoma tihe, motijo tok svetlobe, kar povzroča senčno migetanje, vpliva na televizijo in na mikrokomunikacijo.

Osnova za delovanje vetrne elektrarne je zadostna hitrost in moč vetra, tako da je potrebno pri umestitvi v prostor upoštevati vetrne razmere. Veter v dolini je drugačne hitrosti, kot na hribu. Prav tako moramo pri postavitvi upoštevati prebivalstvo, saj je vetrnica glasna in tako povzroča razne zdravstvene nevšečnosti.

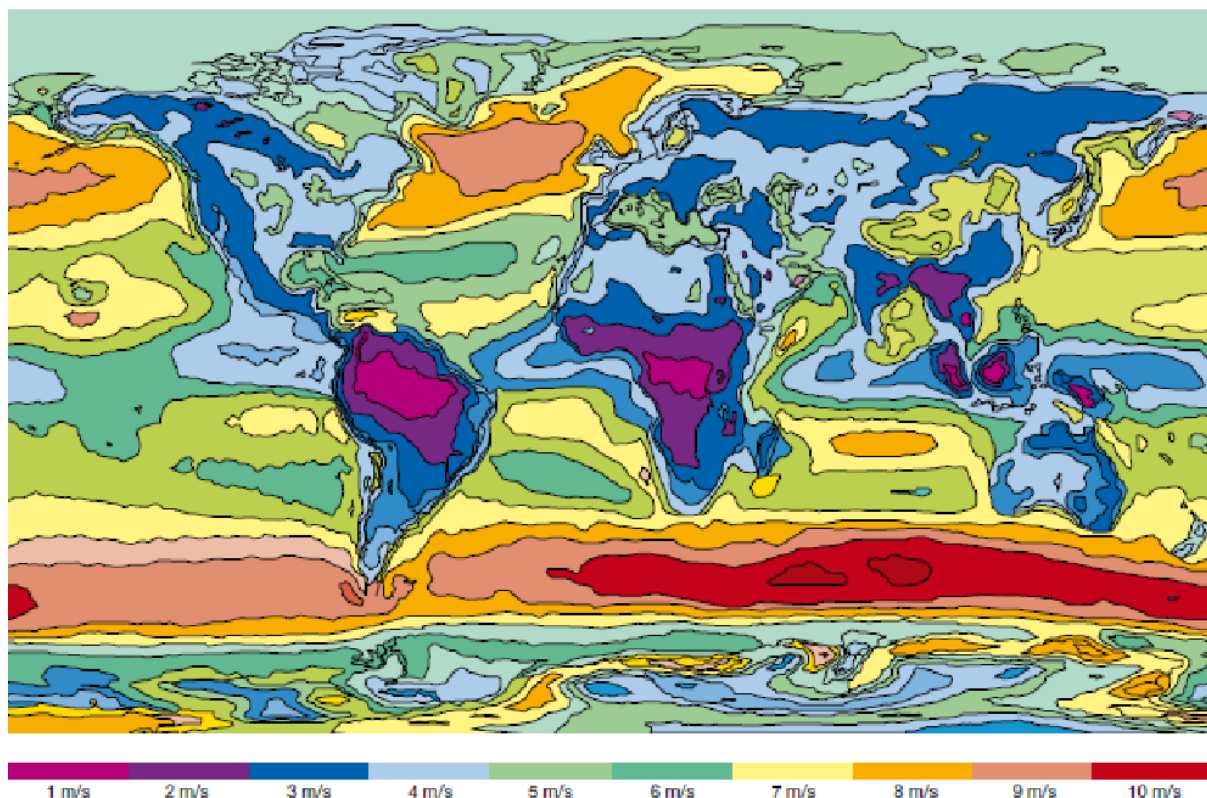
1.4 Vrste vetrov

Veter je posledica neenakomernega segrevanja površine Zemlje. Ločimo naslednje vrste vetrov:

- "planetarni vetrovi so posledica ogrevanja površine Zemlje vzdolž ekvatorja, ki je precej intenzivnejše kot v področju južnega in severnega pola. To povzroči dvigovanje toplega in vlažnega tropskega zraka na ekvatorju in nato njegovo gibanje skozi višje plasti atmosfere v smeri proti poloma, medtem ko se hladni zrak na obeh polih ob površini Zemlje usmeri proti ekvatorju. Topel tropski zrak se v višjih slojih ohladi in na meji med zmernim in subtropskim pasom spusti na površino Zemlje.

Pretežni del se ga ob površini Zemlje usmeri nazaj proti ekvatorju manjši del pa nadaljuje pot proti poloma in pri 60° zemljepisne širine trči ob zračne mase, ki se spuščajo od obeh polov. To povzroči ponovno dviganje zračnih mas v troposfero. Večji del zraka se v troposferi usmeri nazaj proti 30° zemljepisne širine, del pa ga potuje najprej proti poloma, kjer se spušča na površino Zemlje in se nato od polov ob površini zemlje usmeri proti ekvatorju, s čimer se krog planetarnega kroženja zračnih mas zaključi. Na smer gibanja planetarnih vetrov vpliva tudi rotacija Zemlje-Coriolisov pospešek. Značilne smeri gibanja zračnih mas sta zahodnik (pri gibanju v smeri od ekvatorja proti poloma) in vzhodnik (pri gibanju v smeri od polov proti ekvatorju).” [2]

- “lokalni vetrovi nastanejo zaradi dveh mehanizmov. Prvi je posledica razlike v ogrevanju kopnega in vodnih površin. Medtem ko se sončno sevanje na kopnem skoraj v celoti pretvori v senzibilno energijo in poviša temperaturo Zemljinega površja, pa se v primeru vodnih površin delno porablja za uparjanje vode, nekaj pa se ga absorbira v gobjih vodnih slojih. Temperatura kopnega se zato povzpne nad temperaturo vodnih površin, kar povzroči intenzivnejše segrevanje zraka nad kopnim, ki se začne dvigati, nadomesti pa ga hladnejši zrak nad vodo. Tako nastane zmorec, ki ga pri nas imenujem maestral. Ponoči se smer vetra obrne, ker se kopno,seveda pri jasnem nebu, ohladi bolj kot voda, tako nastane kopnik, pri nas imenovan burin. Drugi mehanizem nastanka lokalnih vetrov je posledica razgibane zemljine površine predvsem hribov in gora. Zrak nad pobočjem se čez dan ogreje, ponoči pa se ohladi veliko intenzivneje, kot zrak v dolinah. To povzroči gibanje toplega zraka ob pobočju navzgor čez dan (gornik), ter gibanje hladnega zraka ob pobočju navzdol (dolnik).” [2]



Slika 1.3: Povprečne hitrosti vetra v svetu na višini 10 m [7]

Na podlagi zahtev za smotrno obratovanje vetrne turbine je potrebna hitrost vetra vsaj 4 m/s. Na sliki 1.3 vidimo, da je na Zemlji kar nekaj področij, kjer ni ugoden veter za postavitev vetrnih turbin. Upoštevati pa moramo, da graf prikazuje veter na višini 10 m, veliko vetrnih turbin pa stoji višje od 10 m, kjer je veter močnejši.

1.5 Vetrne elektrarne v svetu, v Sloveniji

Z vetrnimi elektrarnami se proizvede letno približno 194,400 GW energije. Vodilna država v svetu po proizvodnji električne energije z vetrnimi elektrarnami je Kitajska, ki ima v obratovanju 80 elektrarn s skupno močjo 45 GW, plan do leta 2030 je, da bi večino električne energije pridobivala iz vetrnih elektrarn. Kot druga ji sledi ZDA s skupno močjo 43 GW, ponaša se pa lahko z eno največjih elektrarn na svetu – Roscoe Wind Farm v Texasu, ki obsega 627 vetrnih turbin s skupne močjo 781 MW. Nato sledi Nemčija, ki se lahko pohvali z največjo turbino na svetu Enercon E-126, ki ima rotor premera 126 m, njena zmogljivost je 7 MW. Nato sledi Španija, ki je vodilna izvoznica opreme za vetrne elektrarne. Na petem mestu je pa Indija, ki proizvede 1,6 odstotka celotne proizvodnje energije.

Vetrna energija je v Sloveniji zaradi birokracije zelo slabo uveljavljena, edina vetrna elektrarna je postavljena v Dolenji vasi na Griškem polju v občini Divača. Elektrarno sestavlja ena vetrnica tipa E-70 moči 2,3 MW nemškega proizvajalca Enercon. Premer rotorja je 72 m, stolp je visok 98 m. Postavljena je bila jeseni 2012. Plan je širitev vetrnega polja s skupno močjo 80 MW.

1.6 Pomembni parametri za izračun

Kinetična energija vetra z maso m , ki se premika s hitrostjo v je podana z enačbo:

$$W_k = \frac{m \cdot v^2}{2} \quad (1.1)$$

Mehanska moč je sprememba energije v enoti časa in enačba se glasi:

$$P_0 = \frac{\rho \cdot v^2 \cdot V}{2 \cdot t} \quad (1.2)$$

$$P_0 = \frac{\rho \cdot v^2 \cdot A \cdot v}{2} = \frac{\rho \cdot v^3 \cdot A}{2} \quad (1.3)$$

Pri čemer je:

- ρ je gostota zraka,
- v^2 je hitrost zraka,
- t je čas,
- A je površina rotorja.

Specifična moč na enoto površine:

$$p_0 = \frac{P_0}{A} = \frac{\rho \cdot v^3}{2} \quad (1.4)$$

Tabela 1: Specifična moč na enoto površine [9]

Hitrost vetra [m/s]	Moč na enoto površine [W/m ²]	Hitrost vetra [m/s]	Moč na enoto površine [W/m ²]
0	0	12	1058,4
1	0,6	13	1345,7
2	4,9	14	1680,7
3	16,5	15	2067,2
4	39,2	16	2508,8
5	76,2	17	3092,0
6	132,3	18	3572,1
7	210,1	19	4201,1
8	313,6	20	4900,0
9	446,5	21	5672,4
10	612,5	22	6521,9
11	815,2	23	7452,3

Izhodna moč turbine je odvisna od hitrost vetra pred in za vetrnico, enačba je pa naslednja:

$$P_s = \frac{1}{2} \cdot \frac{m}{t} \cdot (v^2 - v_0^2) \quad (1.5)$$

Pri čemer je:

- v – hitrost vetra pred turbino
- v_0 – hitrost vetra za turbino

Največjo moč dobimo, če bi bila hitrost vetra za turbino enaka nič, to pa je nesmiselno, fizikalno je smiselno odvzeti največji del energije, ki jo je možno.

Enačba sile, ki deluje na rotor, se glasi:

$$F = \frac{m}{t} \cdot (v - v_0) \quad (1.6)$$

Moč, ki je potrebna za potisk mase zraka s hitrostjo v' :

$$P = F \cdot v' = m \cdot (v - v_0) \cdot \frac{v'}{t} \quad (1.7)$$

Srednja hitrost zraka:

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{m}{t} \cdot (v^2 - v_0^2) = \frac{m}{t} \cdot (v - v_0) \cdot v' \quad (1.8)$$

$$v' = \frac{1}{2} \cdot (v + v_0) \quad (1.9)$$

Masni tok skozi rotor:

$$\frac{m}{t} = \rho \cdot A \cdot \frac{v + v_0}{2} \quad (1.10)$$

Moč turbinskega kolesa:

$$P_g = \frac{1}{2} \cdot \left(\rho \cdot A \cdot \frac{v + v_0}{2} \right) \cdot (v^2 - v_0^2) \quad (1.11)$$

Razmerje med močjo na gredi rotorja in mehansko močjo gibajočega zraka:

$$c_p = \frac{P_g}{P_0} = \frac{\frac{1}{4} \cdot \rho \cdot A \cdot (v^2 - v_0^2) \cdot (v + v_0)}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3} \quad (1.12)$$

Po preureditvi dobimo izkoristek rotorja:

$$c_p = \frac{\left(1 + \frac{v_0}{v}\right) \cdot \left(1 - \left(\frac{v_0}{v}\right)^2\right)}{2} \quad (1.13)$$

Izkoristek je odvisen od hitrostnih razmer pred in za vetrno turbino, torej od razmerja $\frac{v_0}{v}$. Optimalno razmerje je 1/3, kar daje največjo možno vrednost c_p , ki je 0,593. Po vstavitvi v enačbo dobimo izraz za največjo dosegljivo moč turbine:

$$P_{\max} = 0,593 \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (1.14)$$

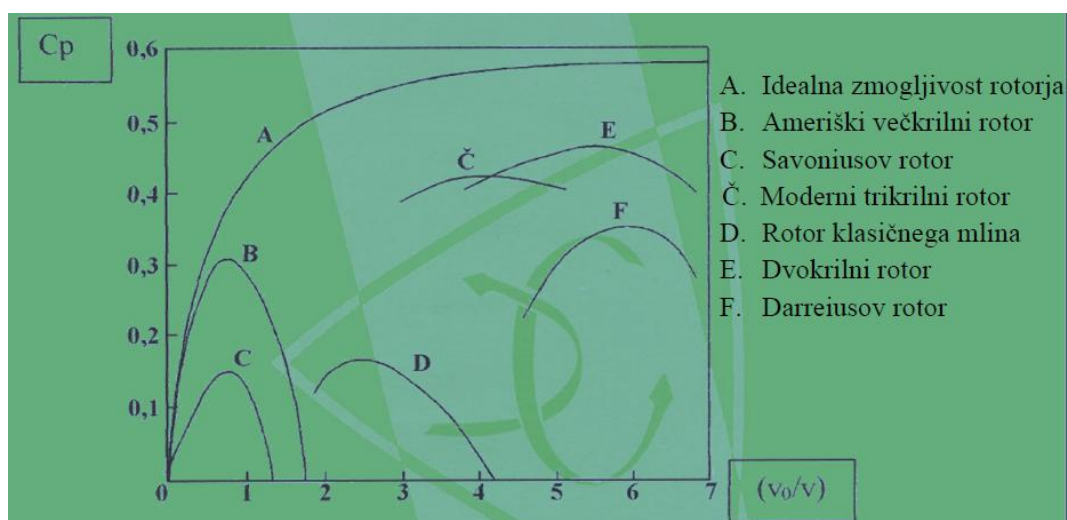
Teoretični izkoristek nam poda razmerje med P_{\max} in P_0 :

$$\eta_{\max} = \frac{P_{\max}}{P_0} = \frac{8}{27} \cdot 2 = 0,5926 \quad (1.15)$$

Glede na izračun lahko vetrnica pretvori v koristno delo približno 60 % energije vetra. V realnosti c_p ne presega 0,5, odvisen je pa od vrste turbine, ali je hitro tekoča, oz. počasna, ali je vertikalna oz. horizontalna, ali je uporovnega oz. vzgonskega tipa...

Hitrostno število:

$$\lambda = \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot R}{v} \quad (1.16)$$



Slika 1.4: Izkoristek vetrnice v odvisnosti od hitrostnega števila [9]

Slika 1.4 predstavlja izkoristke v odvisnosti od hitrostnega števila za različne primere vetrnic. Krivulja A predstavlja teoretičen izkoristek, ki pa ga je v praksi zelo težko doseči.

Opazimo lahko, da hitrostno število zelo vpliva na izkoristek. Dejanski izkoristki se gibljejo okrog 30-40 %, optimalni izkoristek se pojavlja v zelo ozkem območju, moč vetrne turbine je:

$$P = P_{\max} \cdot \eta = \eta \cdot \frac{1}{2} \cdot A \cdot v_i^3 \quad (1.17)$$

Enačba, ki podaja navor, ki deluje na gred, se glasi:

$$T = \frac{P}{\omega} = \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot n} = \eta \cdot \frac{1}{8} \cdot \frac{\rho \cdot D^2 \cdot v_i^3}{n} \quad (1.18)$$

2 TEORETIČNE OSNOVE RAČUNALNIŠKE DINAMIKE TEKOČIN

RDT je kratica za računalniško dinamiko tekočin (ang. CFD or Computational Fluid Dynamics) in zajema numerično simulacijo toka kapljevite, plinaste in trdne snovi. Uporablja se v različnih panogah, v avtomobilski in letalski industriji, v medicini... Osnova RDT so zakoni ohranitve mase, energije, gibalne količine in snovi. V našem primeru smo uporabili samo zakona ohranitve mase in gibalne količine.

Najpogosteje opisujemo tok, stisljive oz. nestisljive in Newtonske oz. ne-Newtonske tekočine z Navier-Stokesovimi enačbami. Matematično so to parcialne diferencialne enačbe, katerim predpišemo robne in začetne pogoje, ter jih nato rešujemo numerično s pomočjo računalnikov.

V današnjem času imamo vse zmogljivejše računalnike, ki so zmožni numerično preračunati s pomočjo računalniških algoritmov na podlagi aproksimativnih metod veliko podatkov.

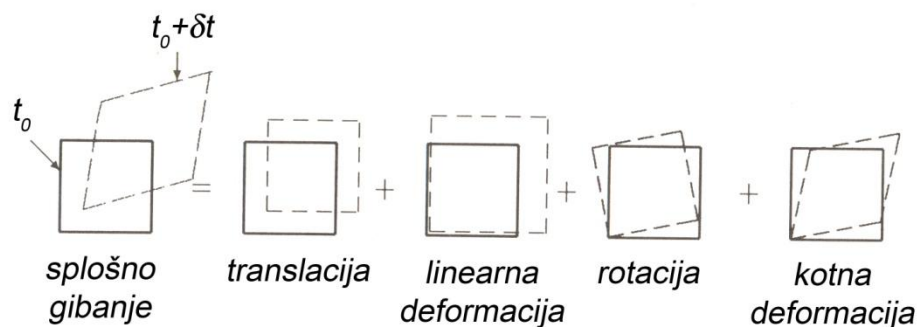
Uporabljajo se naslednje aproksimativne metode:

- metoda utežnih ostankov,
- metoda končnih razlik,
- metoda končnih volumnov,
- metoda končnih elementov,
- metoda robnih elementov.

Večina komercialno uporabljenih računalnikov uporablja metodo končnih volumnov, pri kateri se integrira ohranitvene enačbe preko vsakega kontrolnega volumna in se jih nato prevede na površinske integrale.

2.1 Enačbe zakonov ohranitve

Na sliki 2.1 vidimo, kako majhen delec v nekem časovnem koraku spremeni svojo obliko in lego.



Slika 2.1: Gibanje in deformacija delca [6]

Na sliki 2.1 je prikazano, da se v nekem času delec premakne iz ene točke v drugo, lahko se mu spremeni oblika, prihaja do linearne deformacije, lahko se zavrti ali pa se kotno deformira. Translacija tekočine se pripisuje pojavu konvekcije, medtem ko se sprememba delca zgodi zaradi gradientov hitrosti v toku tekočine in procesa difuzije. V kompleksnejših pojavih toka tekočine imajo vpliv na gibanje delca tekočine še izvori oziroma ponori energije v tekočini.

Vsi pojavi, ki vplivajo na gibanje in obnašanje tekočine so vključeni v enačbah ohranitvenih zakonov mase, gibalne količine, energije in snovi. Enačbe sledijo vplivu konvekcije, difuzije, izvorov in ponorov na delec tekočine v nekem določenem času. Povezava med enačbami je taka, da ima sprememba neke spremenljivke (npr. temperature) v eni enačbi vpliv na spremembo neke druge spremenljivke v drugi enačbi (npr. tlaka). [10]

Zakon o ohranitvi mase [6]

Masa masnega sistema je konstantna veličina:

$$m(t) = \int_{V_m} \rho(\vec{r}, t) dV = konst \text{ in } \left(\frac{Dm}{Dt} \right)_{V_m} = \frac{D}{Dt} \int_{V_m} \rho dV = 0 \quad (2.1)$$

Zakon ohranitve mase homogene snovi v integralski obliki:

$$\frac{D}{Dt} \int_{V_m} \rho dV = \int_{V_k} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \int_{A_k} \rho \vec{v} \cdot dA = 0 \quad (2.2)$$

Kontinuitetno oz. diferencialno enačbo zakona ohranitve mase dobimo tako, da s pomočjo Gaussovega stavka prevedemo površinski integral v volumski integral:

$$\int_{V_k} \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v}) \right] dV = 0 \quad (2.3)$$

Zaradi poljubnega kontrolnega volumna mora biti integrand v oklepaju nič:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (2.4)$$

Oziroma v obliki kartezijskih pravokotnih koordinat:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho v_x}{\partial x} + \frac{\partial \rho v_y}{\partial y} + \frac{\partial \rho v_z}{\partial z} = 0 \quad (2.5)$$

Za stacionarni tok stisljive tekočine se enačba poenostavi v:

$$\vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (2.6)$$

Najpreprostejša kontinuitetna enačba, ki velja za tok nestisljive tekočine in za stacionarne in nestacionarne tokove se glasi:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{v} = 0 \quad (2.7)$$

Zakon ohranitve gibalne količine [3]

Osnovo predstavlja Reynoldsov prenosni teorem. V integralni obliki za nek kontrolni volumen se teorem glasi:

$$\int_{V_k} \left[\frac{\partial(f\rho)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (f\rho\vec{v}) - \gamma \right] dV = 0 \quad (2.8)$$

V diferencialni obliki se pa glasi:

$$\frac{\partial(f\rho)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (f\rho\vec{v}) - \gamma = 0 \quad (2.9)$$

$$f = \frac{F}{m} \quad (2.10)$$

V γ so zajeti izviri in ponori spremenljivke F.

V kartezijskem koordinatnem sistemu zapišemo naslednje enačbe ohranitve gibalne količine v komponentni obliki:

$$\frac{\partial v_x}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \vec{\nabla})v_x = f_{mx} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + v_0 \Delta v_x \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial v_y}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \vec{\nabla})v_y = f_{my} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + v_0 \Delta v_y \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial v_z}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \vec{\nabla})v_z = f_{mz} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + v_0 \Delta v_z \quad (2.13)$$

Pri čemer je:

$$(\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) = v_x \frac{\partial}{\partial x} + v_y \frac{\partial}{\partial y} + v_z \frac{\partial}{\partial z} \quad (2.14)$$

In

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (2.15)$$

2.2 Turbulentni tok

V realnosti se najpogosteje pojavlja turbulentni tok. Pri opisu vrste in karakteristike toka je najpomembnejše Reynolds-ovo število Re , ki je določeno z razmerjem med vztrajnostno in viskozno silo:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\mu} \quad (2.29)$$

kjer je

- ρ gostota tekočine,
- v je aksialna komponenta hitrosti tekočine v cevi,
- d je karakteristična dolžina (npr. premer cevi)
- μ je dinamična viskoznost tekočine.

Za upoštevanje turbulence v Navier-Stokesovih enačbah je uporabljenih kar nekaj metod. Večina teh metod ima v primeru turbulentnega toka razdeljeno vrednost spremenljivk na časovno povprečno vrednost in oscilirajoči del $\tilde{v}_i + v_i'$. Po postopku povprečenja so povprečne vrednosti oscilirajočih komponent enake nič. Edini člen, ki je pozitiven je tisti, ki opisuje produkt dveh oscilirajočih členov. Enačba ohranitve gibalne količine se lahko zapiše kot Reynolds-ova enačba turbulentnega toka:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho v_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_i v_j) = & -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) \right] + \\ & + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{v_i' v_j'}) + \rho g_i + F_i \end{aligned} \quad (2.30)$$

kjer se enačba ohranitve gibalne količine turbulentnega toka razlikuje od enačbe ohranitve gibalne količine laminarnega toka za člen $\overline{v_i' v_j'}$, ki se imenuje člen Reynolds-ovih oziroma turbulentnih napetosti. [10]

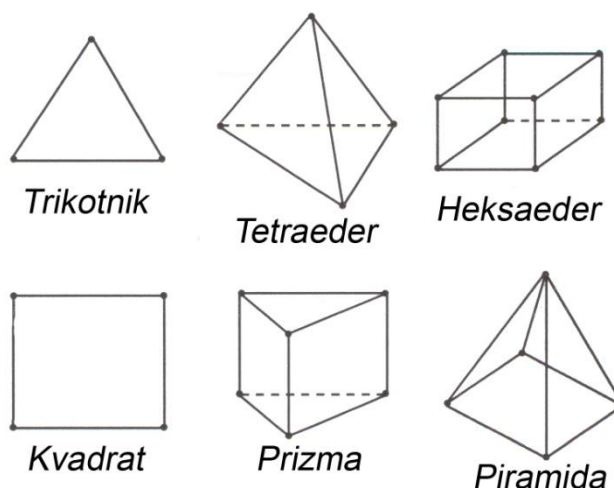
Za izračun turbulentnih napetosti so potrebne dodatne zveze tako imenovane turbulentni modeli, ki povezujejo omenjene izraze z vrednostmi časovno povprečnih spremenljivk in njihovih odvodov. Temelj turbulentnih modelov so modelne predpostavke in empirični podatki.

V našem delu smo uporabili dvo-enačbeni model:

- **SST (Shear Stres Transport) k - ω model**, ki je sestavljen iz dveh enačb za parametra k in ω . Ta model podaja prednosti obeh dvo-enačbenih modelov k - ε in k - ω . Prvi nam poda tok zunaj mejne plasti, drugi nam poda natančne podatke o toku pri steni. Neodvisen je od začetnih pogojev, prednost SST je v natančni napovedi odcepitve toka, slabost je netočno napovedovanje ponovnega urejanja toka.

2.3 Numerična diskretizacija

Vsak računalnik razume algebrajske enačbe, tako je tudi v tem primeru, kjer se diferencialne enačbe s pomočjo zgoraj omenjenih aproksimativnih metod pretvorijo v računalniku razumljiv jezik. Pri numerični diskretizaciji je zelo pomembna računsko mreža, ki je sestavljena iz mrežnih točk in elementov (slika 2.2).



Slika 2.2: Oblike elementov, ki se uporabljajo v računskih mrežah.

3 NUMERIČNI PRERAČUN VETRNE TURBINE

Pri numerični simulaciji smo uporabili programski paket ANSYS CFX 14.5. Najprej je bilo potrebno zmodelirati model vetrne turbine. Kot drugo je bilo potrebno model zamrežiti, ter nato vse skupaj vnesti v glavni program, ki je sestavljen iz treh delov:

1. V prvem (predprocesiranje oz. cfxpre) delu prepišemo vse lastnosti,
2. V drugem (računanje oz. cfxsolve) poteka izračun,
3. V tretjem (obdelava rezultatov oz. cfxpost) rezultate analiziramo.

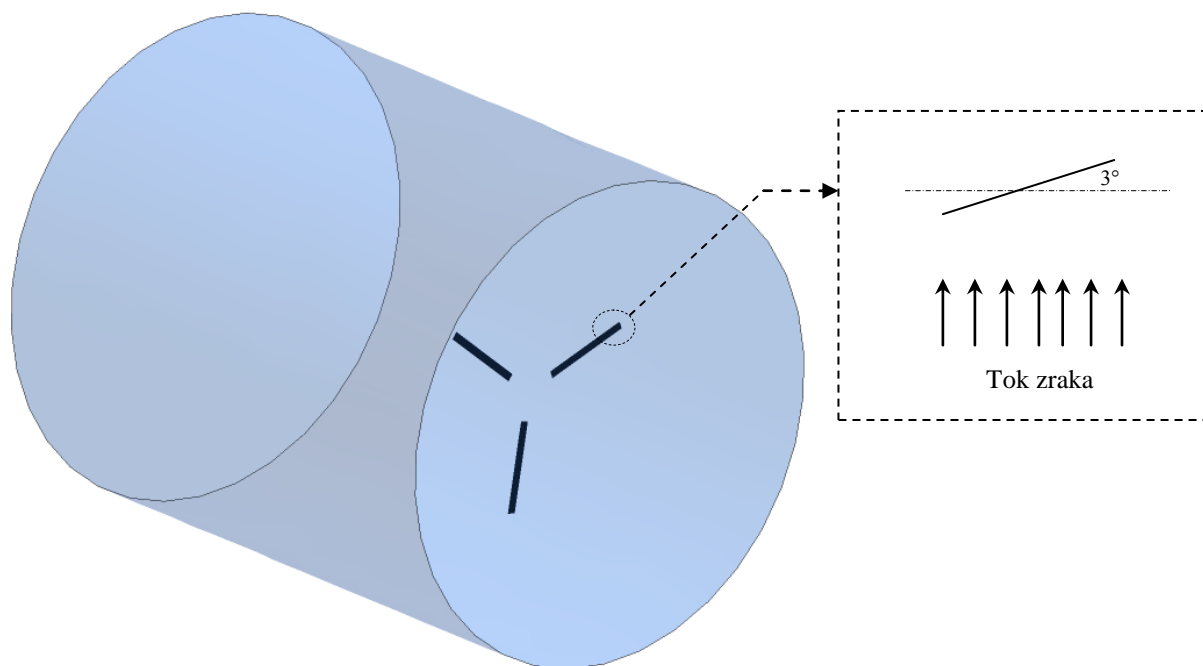
Osnovne predpostavke so bile:

- geometrijsko enostaven primer vetrnice,
- lopatice so ravne, imajo višino, širino in so brez debeline,
- lopatice po dolžini niso zavite, so pa nagnjene za 3° ,
- zrak je nestisljiv,
- izračun je stacionaren,
- simulira se le tretjina vetrnice (ena lopatica).

3.1 Geometrija vetrne turbine:

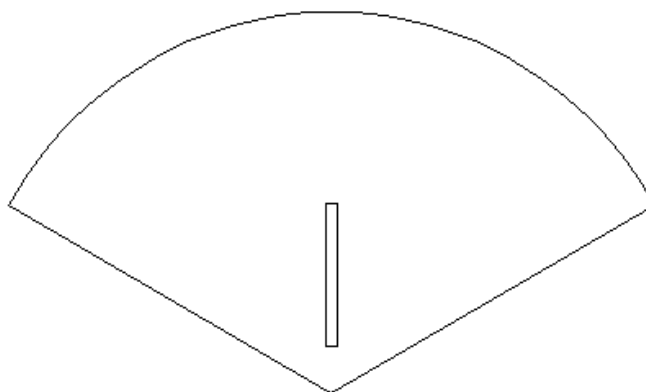
Geometrijo smo izdelali s programom Geometry, ki je del programskega paketa Ansys. Najprej smo naredili celotni model trikrake vetrnice, nato smo se zaradi določenih omejitev (predvsem računskih časov) odločili napraviti tretjinski model, katerega analizo bom predstavil v nadaljevanju.

Na sliki 3.1 je prikazana celotna vetrna turbina, ki je horizontalne izvedbe, trikraka, rotorske lopatice so nagnjene za 3° , dolžina od izhodišča-pesta do začetka lopatice je 2 m, dolžina lopatice pa 6 m. Širina lopatice je 0,5 m in lopatica nima debeline, je neskončno tanka. Geometrija vetrnih lopatic je obdana z območjem (valj), v katerem je predpisan zrak in le ta ima polmer dve dolžini lopatice, torej 16 m. Računsko območje, ki je za vetrno turbino, je bistvenega pomena za rezultate tokovnega polja, kjer predpišemo štiri dolžine lopatice in sicer 32 m. Pred vetrnico pa je območje dolgo 8 m.



Slika 3.1: Model vetrne turbine

Ker smo pa želeli sam izračun izvesti čim bolj optimalno, torej čim krajši čas izračuna za zadovoljiv rezultat in tudi zaradi same omejitve z računalniško opremo, ki smo jo imeli na razpolago, smo se odločili za tretjino celotne vetrnice (slika 3.2).



Slika 3.2: Tretjina vetrne turbine

Geometrijski parametri so ostali enaki kot pri celotni turbini, edina razlika je v računskem območju, ki ga je bilo potrebno zamrežiti.

3.2 Računska mreža modela vetrne turbine

Najpomembnejši del preračuna je mreža, saj mora imeti ravno pravšnje število elementov, potrebno je zelo dobro poznati fizikalne karakteristike, katera področja v modelu bolj vplivajo na rezultat in tam je potrebno zgostiti mrežo. Seveda je pa zgostitev mreže povezano z daljšimi časi preračuna.

Mreža je bila izdelana v programu ICEM CFD. Izdelane so bile tri različne mreže za tretjinski model (tabela 2 in slike 3.3 do 3.6), pri čemer je bila v vseh primerih mreža najbolj zgoščena na površini lopatice. Mreže so bile sestavljene iz tetraedrov in piramid, pri čemer je okoli površine lopatice bila izdelana mejna plast prizmatičnih elementov (t.i. Inflation layer).

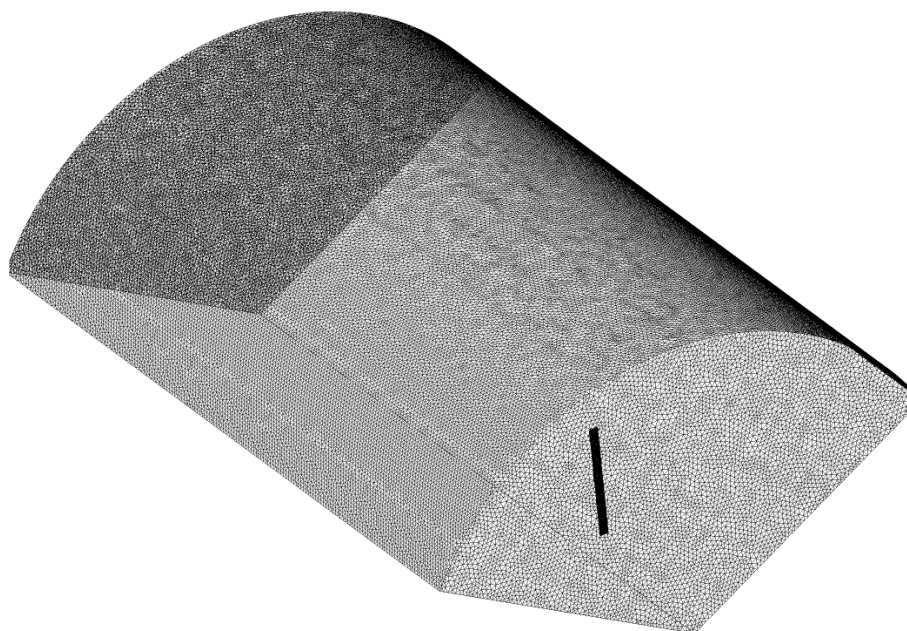
Tabela 2: Različne mreže z različnim številom vozlišč in elementov

	Število vozlišč (v milijonih)	Število elementov (v milijonih)
MREŽA 1	2,12	12,5
MREŽA 2	0,512	2,9
MREŽA 3	0,318	1,74

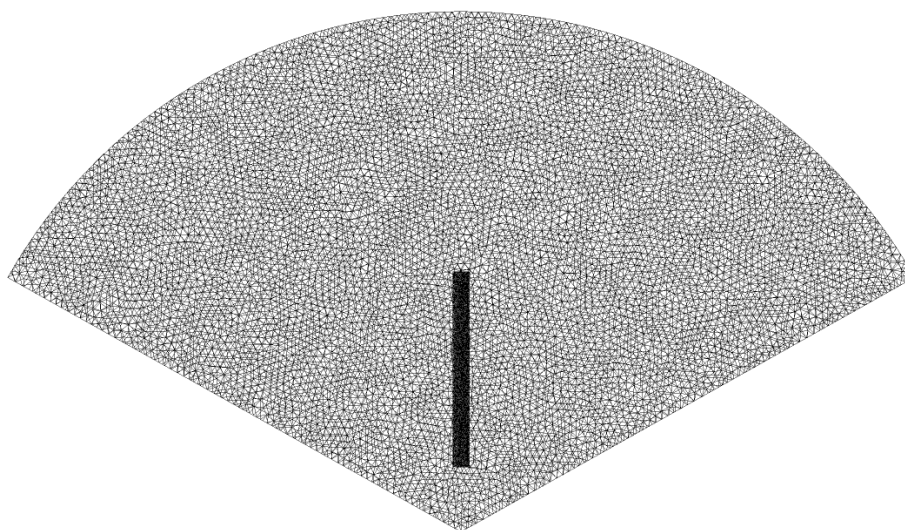
Po uporabi vseh treh računskih mrež se je izkazalo, da je optimalna druga mreža. Ta mreža je bila izbrana zato, ker so bili računski časi najkrajši pri še zadovoljivih rezultatih. Kot glavni kriterij smo uporabili navor, ki je deloval na lopatico. Na podlagi izračunanega navora (Tabela 3) smo dalje izračunali še moč, izkoristek in razmerje hitrosti. V primerjavi s prvo mrežo so bila odstopanja v rezultatu navora minimalna, čas računanja pa je bil za tretjino krajši, kar pa ni zanemarljivo. Rezultat navora pri tretji mreži se je zelo razlikoval od prejšnjih dveh. Po izračunu ostalih parametrov smo dobili nerealne rezultate, zato ta mreža ni bila primerna.

Tabela 3: Različni navor pri različnih mrežah

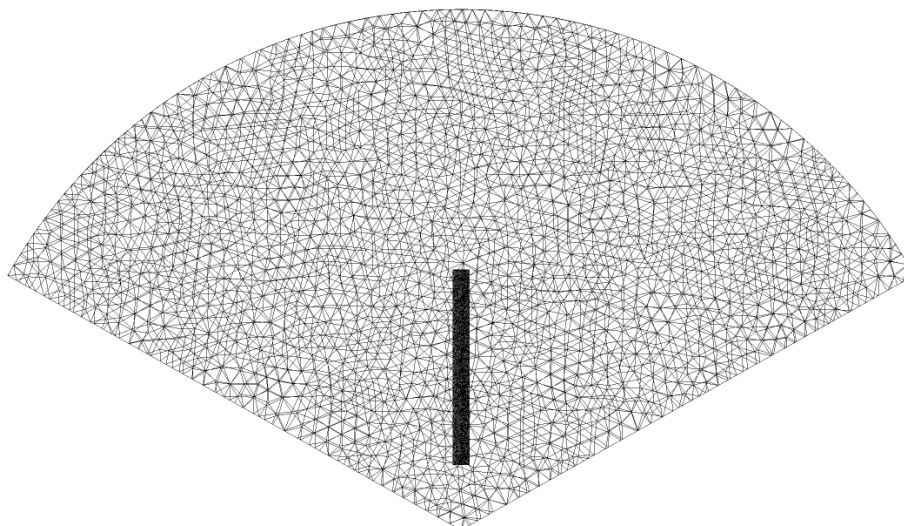
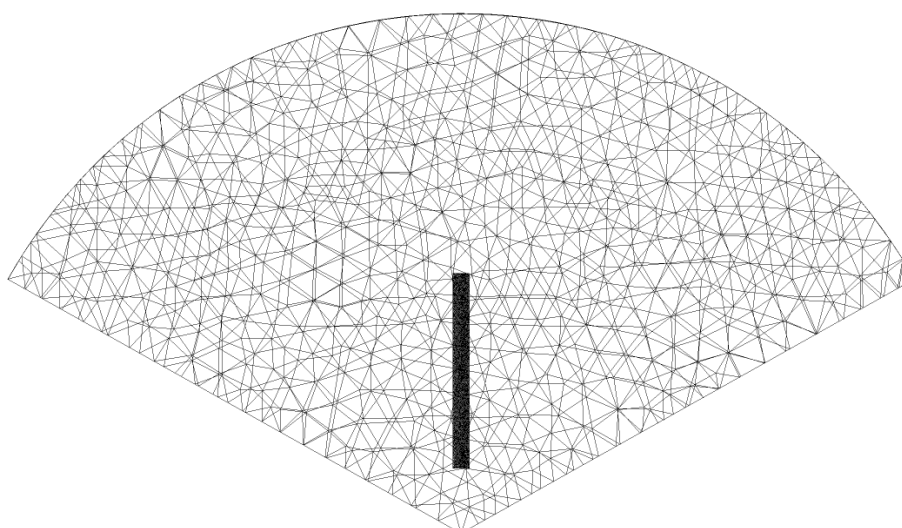
	Navor [Nm]
MREŽA 1	155,6
MREŽA 2	168,4
MREŽA 3	248,1



Slika 3.3: Mreža 1 - celotni model



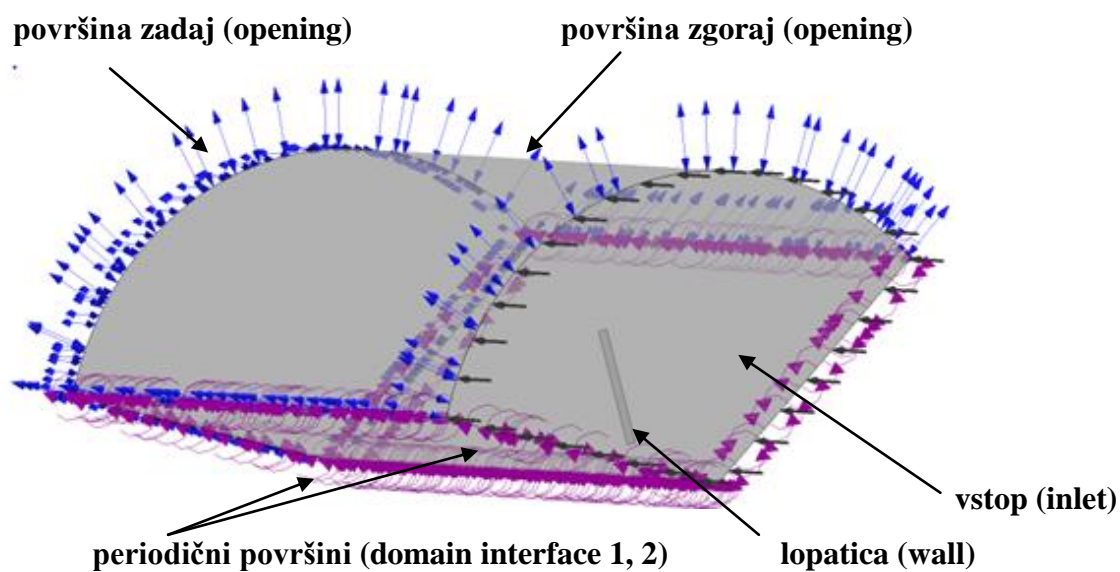
Slika 3.4: Mreža 1

**Slika 3.5: Mreža 2****Slika 3.6: Mreža 3**

3.3 Numerični model

Pomembnega značaja za samo izvedbo simulacije so fizikalni modeli, ki jih bomo uporabili, ter robni in začetni pogoji. Celotno območje je bilo v tem primeru definirano kot rotirajoče, kar pomeni, da so se enačbe izračunavale v rotirajočem koordinatnem sistemu.

Tok je bil izotermen pri temperaturi 25°C. Turbulenco toka smo opisali s pomočjo dvoenačbnega SST modela. Tipi robnih pogojev, ki so predpisani na površinah numeričnega modela so podani na sliki 3.7.



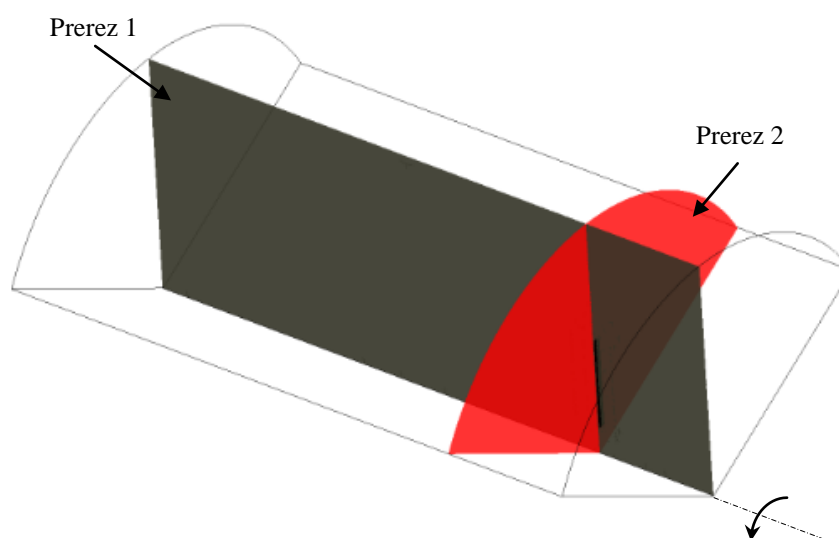
Slika 3.7: Robni pogoji

Na vstopu so bile predpisane različne hitrosti vetra od 6,8 m/s do 15 m/s in dve različni vrtilni frekvenci vetrnice in sicer 100 vrt/min in 120 vrt/min.

4 REZULTATI IN ANALIZA

Namen simulacije je bil določiti karakteristike (navor, moč, faktor izkoristka, tokovno polje) obravnavane vetrne turbine z različnimi vstopnimi hitrostmi vetra: 6,8m/s; 7m/s; 8m/s; 9m/s; 10m/s; 11m/s; 12m/s; 13m/s; 14m/s in 15m/s pri dveh vrtilnih frekvencah 100 in 120 vrt/min.

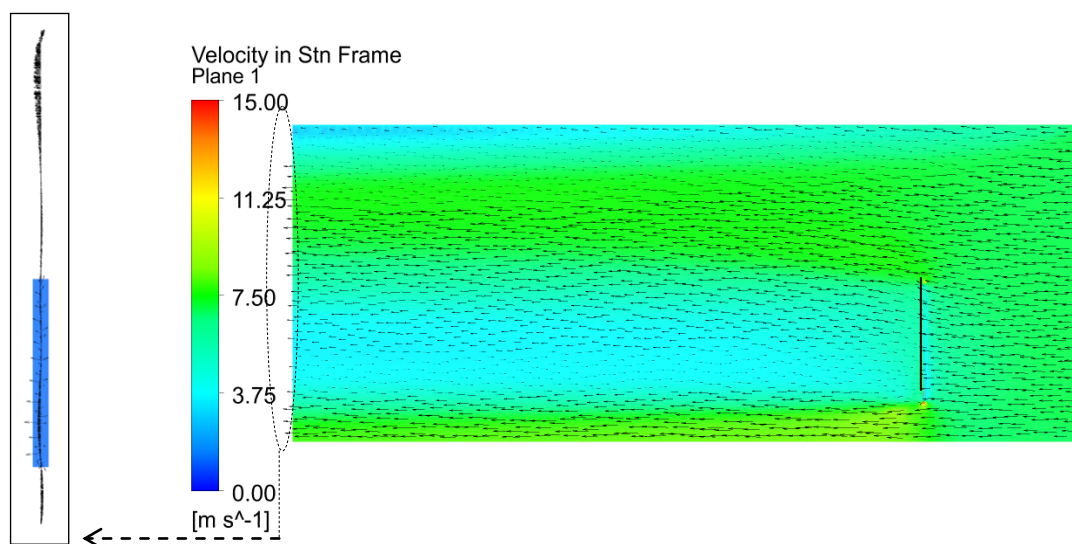
V začetku je predstavljena primerjava rezultatov med primeroma za obe vrtilni frekvenci pri dveh hitrostih vetra 7 m/s in 11 m/s. Rezultati so predstavljeni na dveh različnih prerezih računskega območja (slika 4.1). Vetrnica se vrti v nasprotni smeri vrtenja urinega kazalca, če gledamo na vetrnico iz smeri toka zraka (slika 4.1).



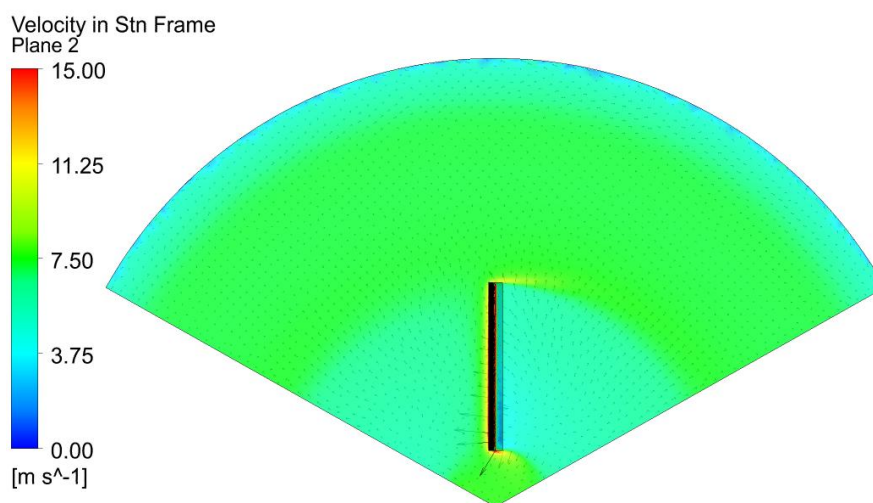
Slika 4.1: Prereza v modelu

4.1 Hitrostno polje

Na sliki 4.2 vidimo, da je na začetku hitrost vetra 7 m/s po celotnem profilu, vendar se kmalu po vstopu hitrost spremeni. Tik pred in za lopatico se hitrost zmanjša na približno polovico začetne, območje nižje hitrosti za lopatico se počasi širi. Na zgornji strani hitrost pada, saj sem prepisal robni pogoj kot odprto območje. Ta robni pogoj se tukaj izkaže kot manj primeren, saj ta tip robnega pogoja nato začne tok v okolici te površine upočasnjevati, kar pa bistveno ne vpliva na samo tokovno polje v notranjosti modela in posledično na navor na lopatici. Verjetno bolj primeren robni pogoj na tej zunanji površini bi bil stena (zdrs na steni - free slip). Na obeh robovih lopatice (spodnji in zgornji strani) pa se hitrost poveča.



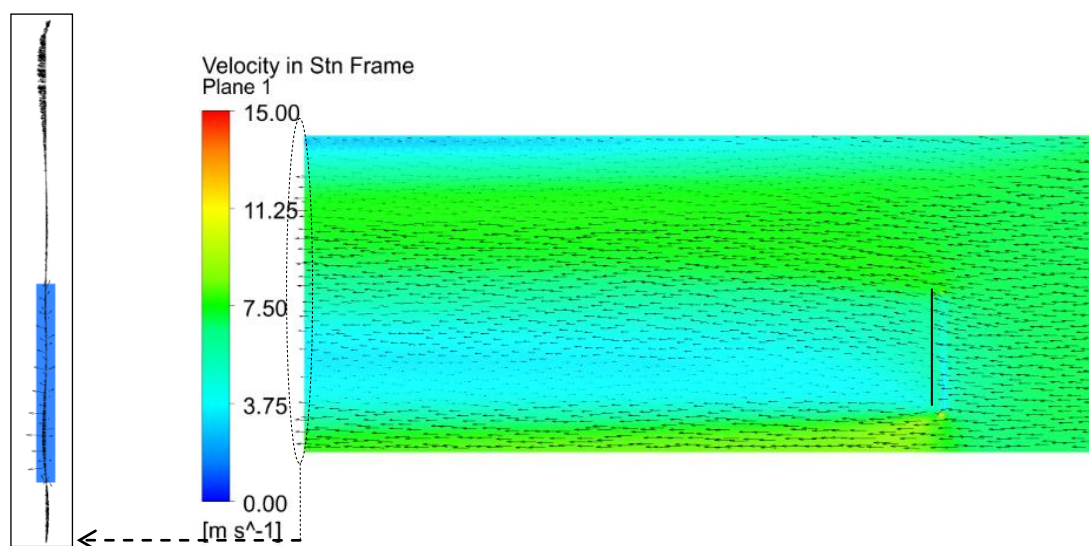
Slika 4.2: Konture in vektorji absolutnih hitrosti pri vstopni hitrosti vetra 7 m/s in frekvenci rotorja 100 vrt/min na prerezu 1



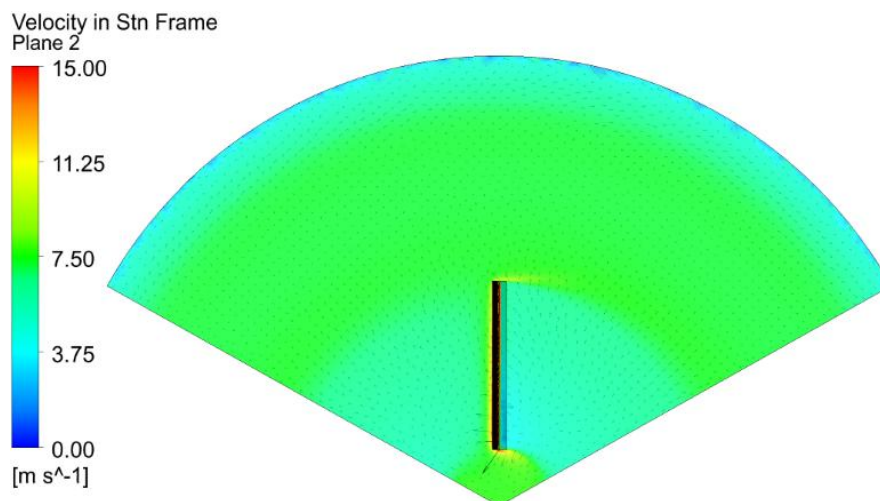
Slika 4.3: Konture in vektorji absolutnih hitrosti pri vstopni hitrosti vetra 7 m/s in frekvenci rotorja 100 vrt/min na prerezu 2

Slika 4.3 prikazuje hitrostno polje na prerezu v smeri normale toka preko lopatice. Hitrost pred lopatico je večja kot za lopatico, saj ko tok zraka zadane lopatico se mu hitrost zmanjša in odda energijo lopatici, ki pa le to prenese na drugi strani toku.

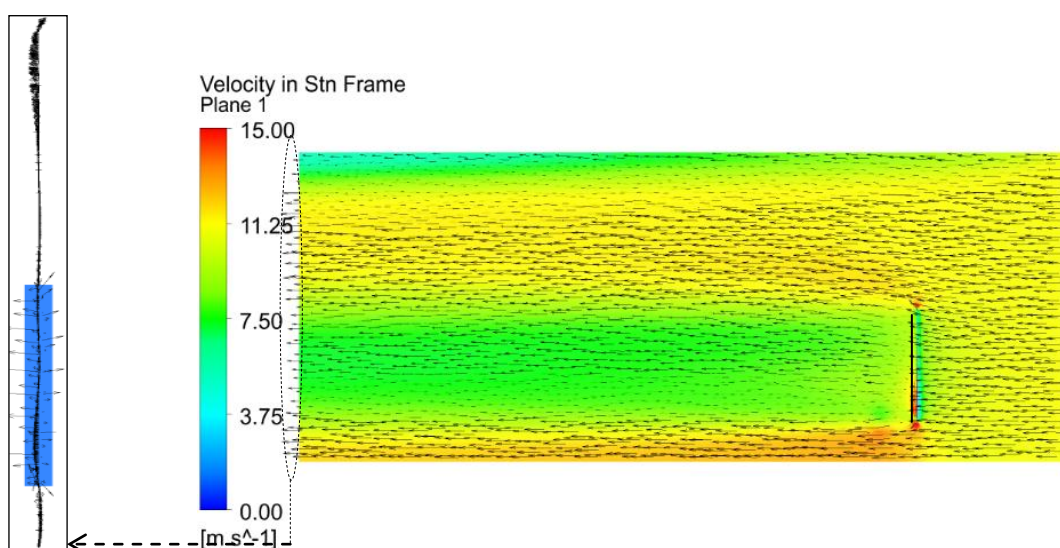
Hitrostni polji za primer pri višji vrtilni frekvenci 120 vrt/min (sliki 4.4 in 4.5) sta podobni prej prikazanima na slikah 4.2 in 4.3, pri čemer so hitrostni gradienti večji.



Slika 4.4: Konture in vektorji absolutnih hitrosti pri vstopni hitrosti vetra 7 m/s in frekvenci rotorja 120 vrt/min na prerezu 1

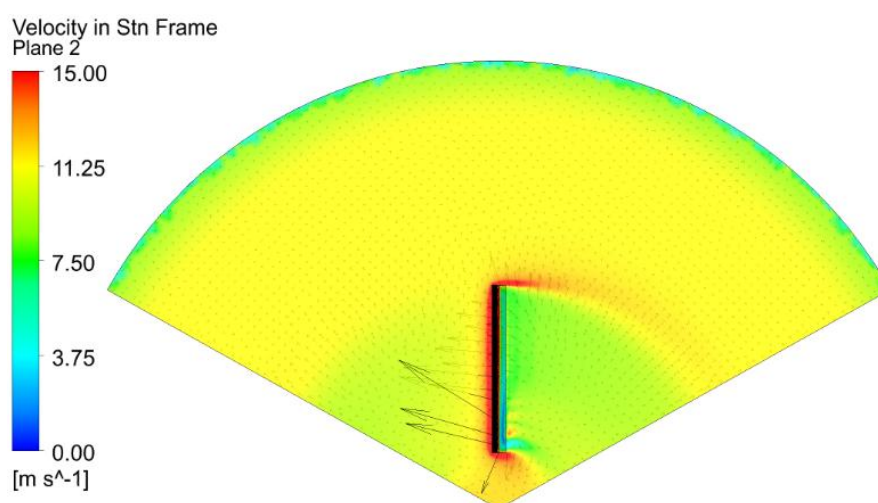


Slika 4.5: Konture in vektorji absolutnih hitrosti pri vstopni hitrosti vetra 7 m/s in frekvenci rotorja 120 vrt/min na prerezu 2



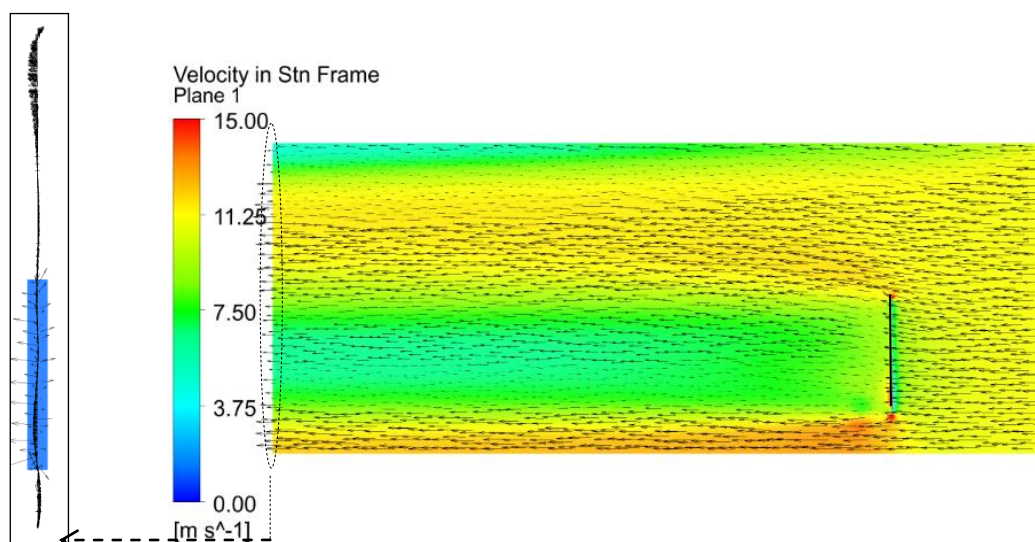
Slika 4.6: Konture in vektorji absolutnih hitrosti pri vstopni hitrosti vetra 11 m/s in frekvenci rotorja 100 vrt/min na prerezu 1

Slika 4.6 prikazuje profil pri hitrosti vetra 11 m/s. Vidimo, da se hitrost pred in za lopatico zmanjšuje, medtem ko se na robovih lopatice hitrost povečuje. Pri sedaj povečani hitrosti vetra v primerjavi z prej prikazanimi rezultati na sliki 4.2 in 4.4 za hitrost toka 7 m/s vidimo, da je vpliv robnega pogoja "opening" na zgornji površini modela še večji. Načeloma pa je porazdelitev hitrostnega polja zelo podobna primeru z nižjo hitrostjo vetra le, da so tukaj višje hitrosti in posledično tudi bolj izrazite konture.

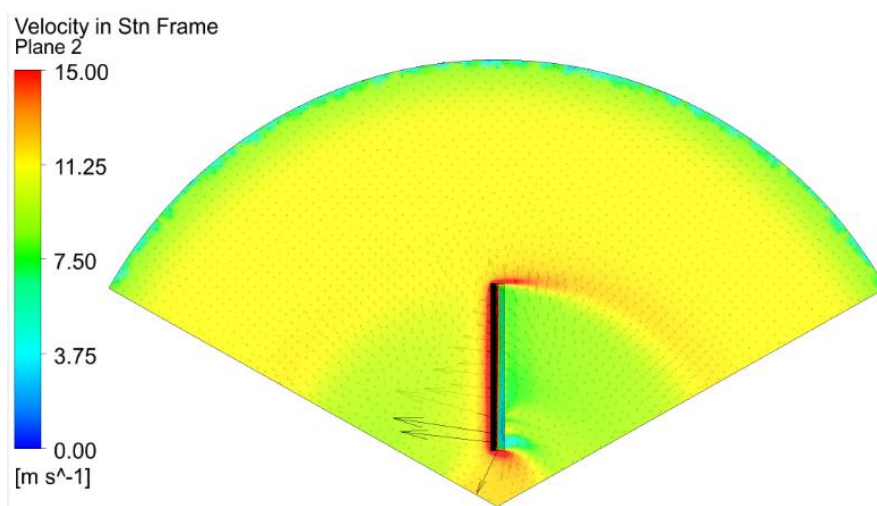


Slika 4.7: Konture in vektorji absolutnih hitrosti pri vstopni hitrosti vetra 11 m/s in frekvenci rotorja 100 vrt/min na prerezu 2

Na sliki 4.7 vidimo, da se na zunanjem in notranjem robu pojavljajo na lopatici velike spremembe hitrosti (predvsem na spodnjem robu za lopatico), kar bi lahko pomenilo določene vrtinčne strukture. Na slikah 4.8 in 4.9 pa je prikazano hitrostno polje pri povečani hitrosti 11 m/s in povečani vrtilni frekvenci 120 vrt/min.



Slika 4.8: Konture in vektorji absolutnih hitrosti pri vstopni hitrosti vetra 11 m/s in frekvenci rotorja 120 vrt/min na prerezu 1



Slika 4.9: Konture in vektorji absolutnih hitrosti pri vstopni hitrosti vetra 11 m/s in frekvenci rotorja 120 vrt/min na prerezu 2

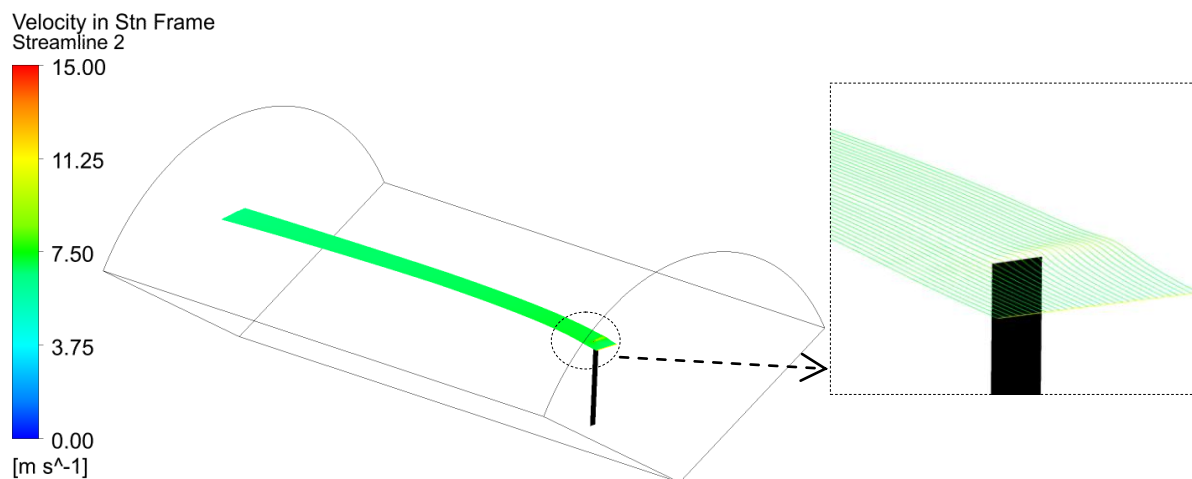
Glede na rezultate hitrostnih polj po dveh prerezih računskega območja je moč zaključiti, da ima sprememba hitrosti vetra iz 7 m/s na 11 m/s bistveno večji vpliv na karakteristiko hitrostnega polja, kot sprememba vrtilne frekvence iz 100 vrt/min na 120 vrt/min.

4.2 Tokovnice pri vstopni hitrosti vetra 7 m/s in 11 m/s in pri vrtilni frekvenci 120 vrt/min

Na slikah 4.10 in 4.12 je podana razporeditev tokovnic, iz katere lahko vidimo, da sam rotor bistveno ne vpliva na tokovno polje in ni možno zaslediti vrtilnih struktur, ki bi jih pričakovali za rotorjem, kar je posledica preredke mreže v območju za rotorjem.

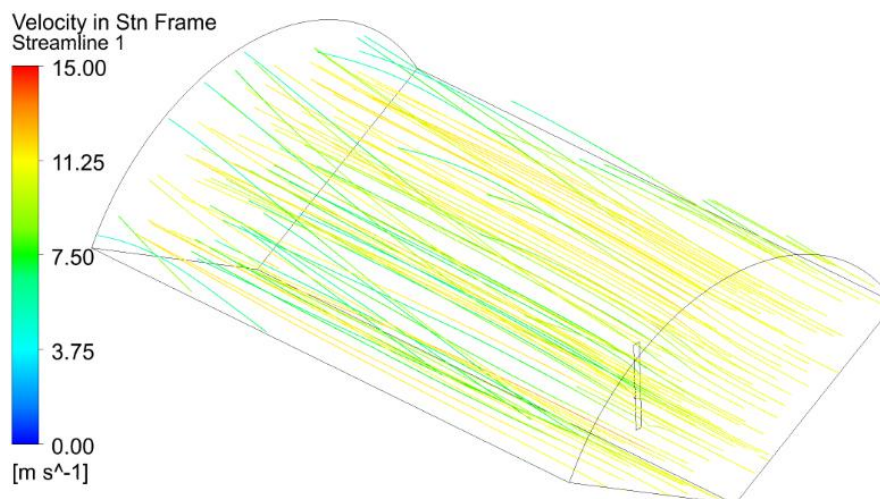


Slika 4.10: Razporeditev tokovnic v računskem območju pri absolutni hitrosti vetra 7 m/s in frekvenci 120 vrt/min



Slika 4.11: Razporeditev tokovnic na višini 7,8 m in 1 m pred lopatico pri absolutni hitrosti vetra 7 m/s in frekvenci 120 vtr/min

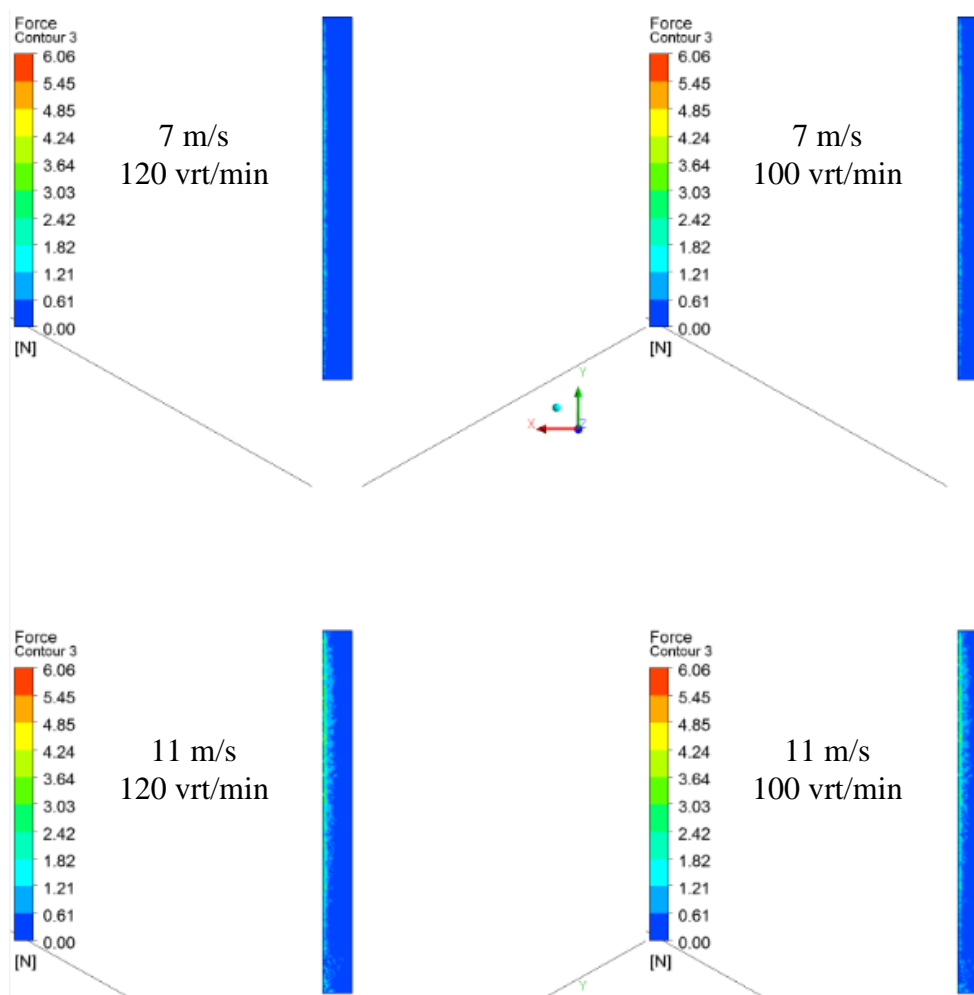
Na sliki 4.11 vidimo, da se tok na vrhu lopatice dvigne in pospeši.



Slika 4.12: Razporeditev tokovnic v računskem območju pri absolutni hitrosti vetra 11 m/s in frekvenci 120 vrt/min

4.3 Sile na lopatici

Na sliki 4.13 so prikazane absolutne sile tlaka, ki delujejo na površino. Sile, ki so prikazane upoštevajo silo tlaka in sile zaradi strižnih napetosti na lopatici. Tlačna sila se izračuna kot tlak na površino lopatice, kar se pri CFX-u izračuna iz izračunanega tlačnega polja na površini lopatice. Na sliki 4.13 je prikazana tudi primerjava sil po površini lopatice. Pri vseh se sila pojavi vzdolž roba lopatice, ki je nagnjena za 3° . Tam prihaja do najintenzivnejšega stika med lopatico in zrakom in s tem tudi do največje sile, ki deluje na lopatico. Večja sila se pojavlja na zgornjem delu lopatice. Če primerjamo vidimo, da ima večji vpliv na razporeditev sil hitrost vetra, saj vidimo, da sta spodnja profila pri 11 m/s bolj izrazita kot zgornja, kjer je hitrost vetra 7 m/s.



Slika 4.13: Razporeditev sil za vse štiri primere

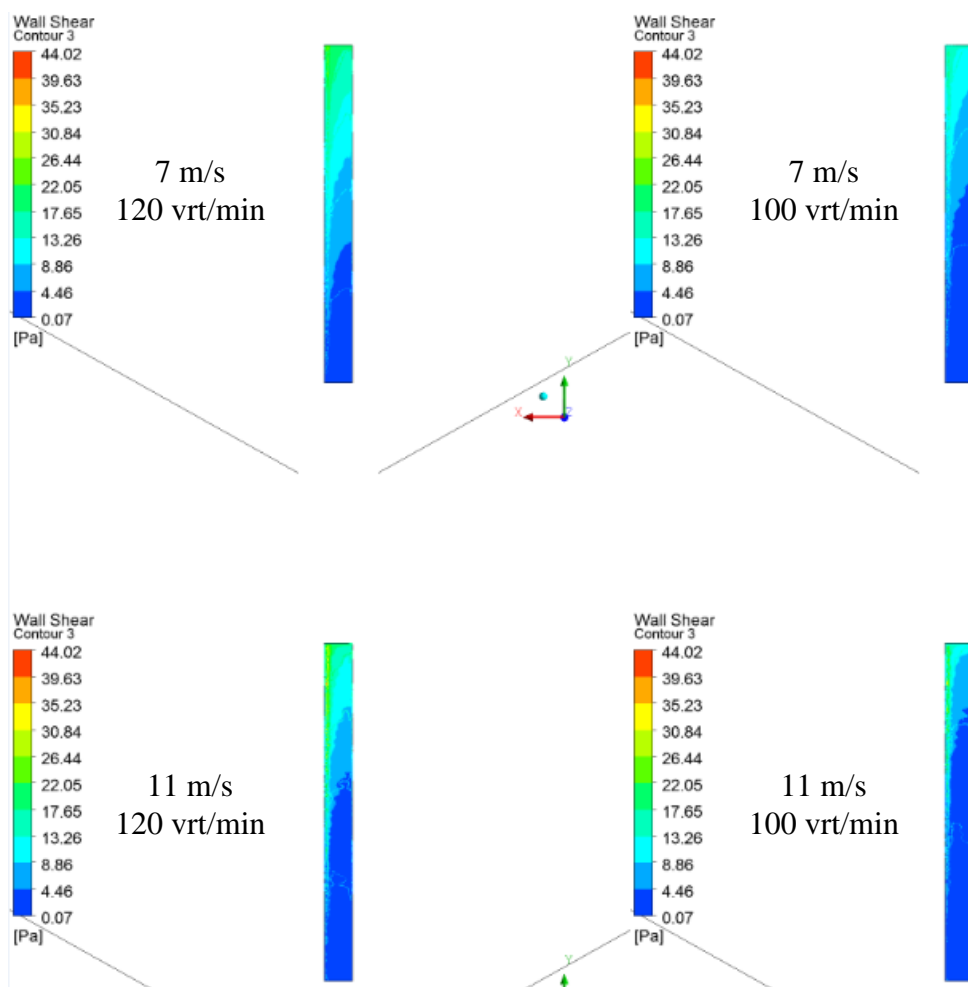
4.4 Strižne napetosti na lopatici zaradi viskoznega trenja

Trenje se vedno pojavlja pri toku tekočine z nehomogeno porazdelitvijo hitrosti kot sila odpora spremembi oblike delca tekočine. Strižna napetost τ_{yx} je proporcionalna gradientu hitrosti v smeri pravokotno na smer toka. [6]

$$\tau_{yx} = \eta \frac{dv_x}{dy} \quad (4.1)$$

Pri čemer je η dinamična viskoznost, v_x hitrost in y razdalja.

Če primerjamo (slika 4.14) profila pri hitrosti vetra 7 m/s vidimo, da pride do višjih strižnih napetosti na površini lopatice pri višji vrtilni frekvenci, enako je tudi pri hitrosti vetra 11 m/s. Iz primerjav lahko sklepamo, da višja hitrost vetra in višja vrtilna frekvenca povzročata večje viskozno trenje. Večja strižna napetost nastaja na vrhu lopatice, saj so proti vrhu lopatice obodne sile večje.

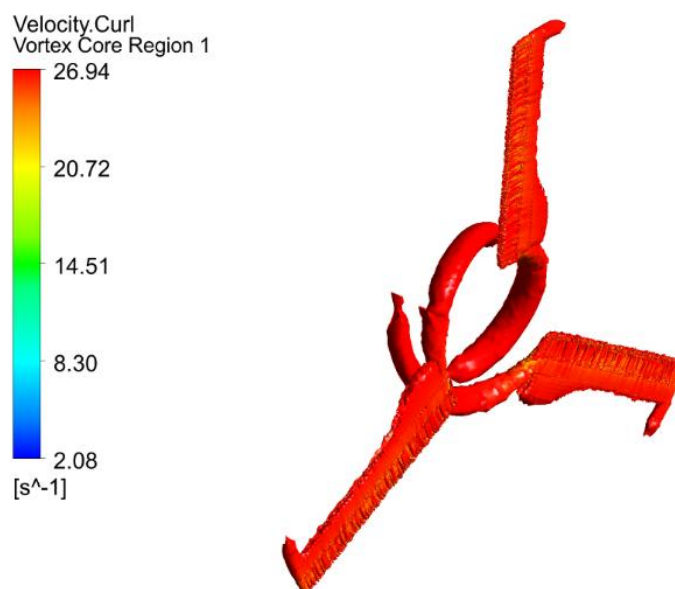


Slika 4.14: Primerjava strižnih napetosti na lopatico za vse štiri primere

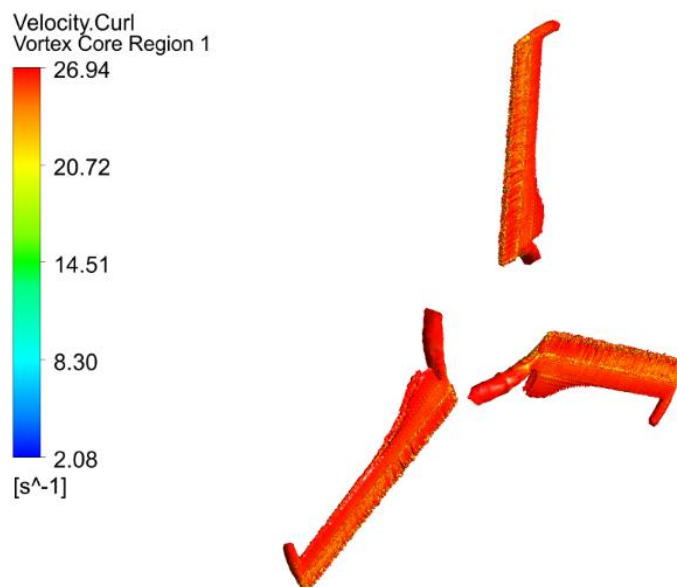
4.5 Vrtinčnost

Vrtinčnost je mera vrtenja delca okrog lastne trenutne osi vrtenja, vektor $\vec{\omega}$ se v tokovnem polju spreminja od točke do točke in po času, torej predstavlja vrtinčno polje. Vrtinčnice so prostorske krivulje, ki v nekem trenutku povezujejo vse delce tekočine, njihovi vektorji pa imajo smer tangente na krivuljo.[6]

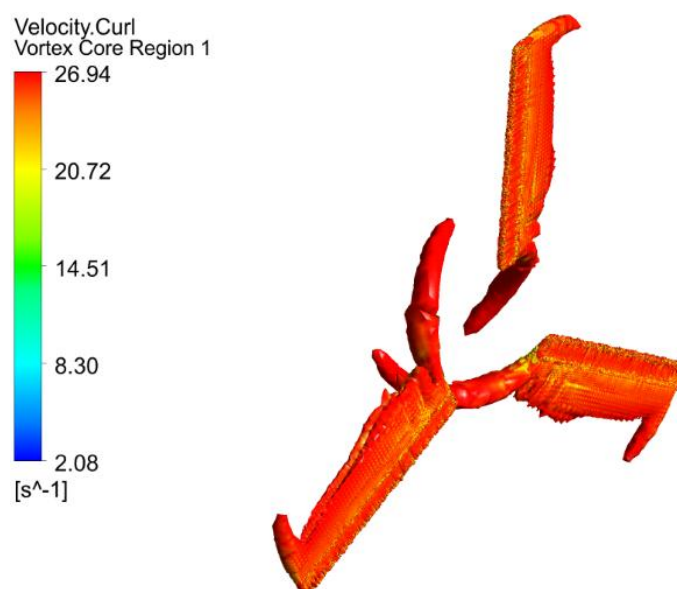
Iz slik 4.15 in 4.16 vidimo, da je isopovršina vrtinčnosti v okolici lopatic pri nižji vrtilni frekvenci manjša, kar je tudi pričakovano. Prav tako se poveča vrtinčnost v primeru višjih hitrosti vetra (sliki 4.17 in 4.18). Na omenjenih slikah je predstavljena isopovršina vrtinčnosti pri neki vrednosti vrtinčnosti 26 s^{-1} in manj.



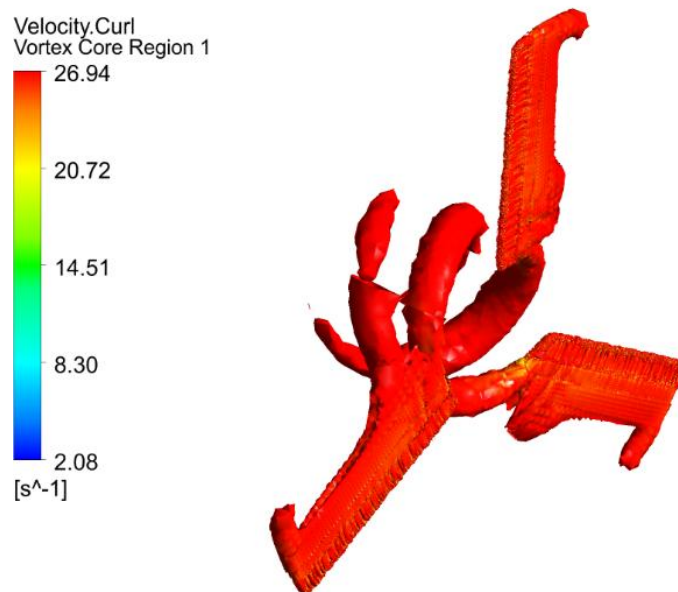
Slika 4.15: Isopovršine vrtinčnosti pri hitrosti vetra 7 m/s in frekvenci 120 vrt/min



Slika 4.16: Isopovršine vrtničnosti pri hitrosti vetra 7 m/s in frekvenci 100 vrt/min

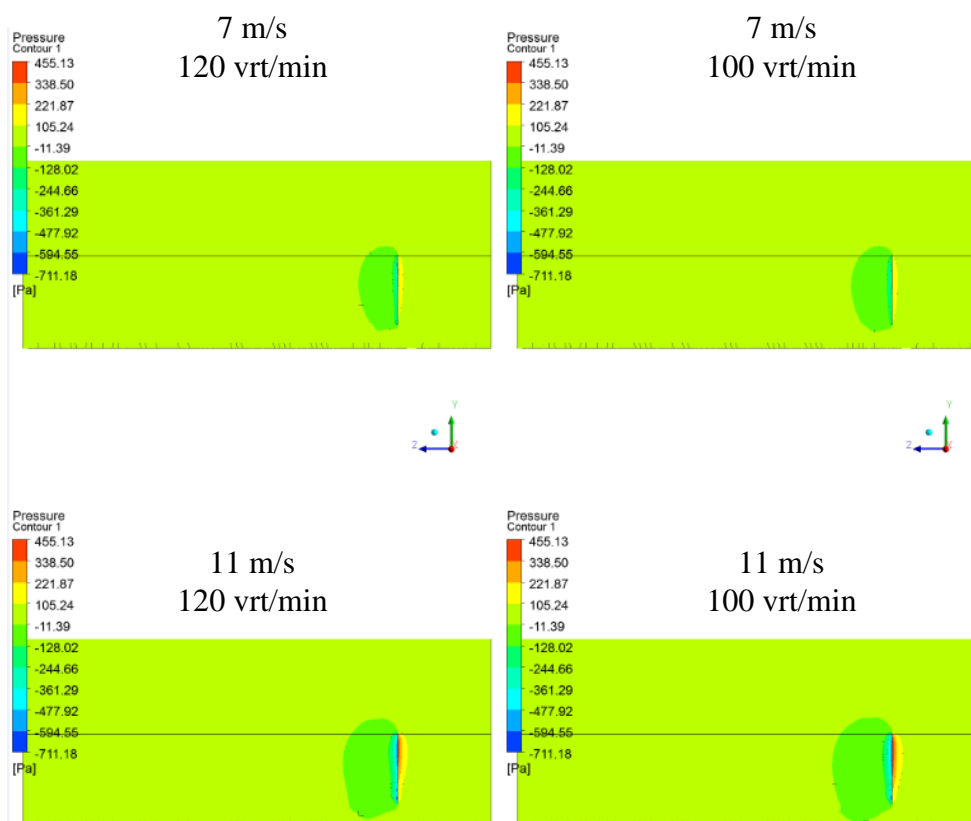


Slika 4.17: Isopovršine vrtničnosti pri hitrosti vetra 11 m/s in frekvenci 100 vrt/min



Slika 4.18: Isopovršine vrtnčnosti pri hitrosti vetra 11 m/s in frekvenci 120 vrt/min

4.6 Tlak



Slika 4.19: Primerjava vseh štirih profilov tlaka

Primerjava tlačnega polja po prerezu vzdolž območja pokaže (slika 4.19), da sprememba vrtilne frekvence nima tako velikega vpliva na tlačno polje, kot ga ima sprememba hitrosti vetra iz 7 m/s na 11 m/s. Pri analizi slik vidim, da se pred lopatico pojavi nadtlak in za lopatico podtlak. Teoretično ta tlačna razlika vrti lopatico. Fizikalno lahko to opišemo s tretjim Newtonovim zakonom. Podobno je tudi pri letalskem krilu.

4.7 Izračun karakteristik

Po zaključku numerične simulacije smo v programu Ansys CFX 14.5 izračunali navor okoli osi Z (predstavlja os vrtenja), ki je deloval na rotorsko lopatico pri vrtilni frekvenci 100 vrt/min in 120 vrt/min za različne hitrosti vetrov. Rezultati so prikazani v nadaljevanju v tabelah in v grafih.

• Vrtilna frekvenca 100 vrt/min

Iz podatkov za navor je bila izračunana moč, izkoristek c_p in razmerje hitrosti (TSR).

➤ Moč - P:

$$P = M \cdot \omega = M \cdot 2 \cdot \pi \cdot n \quad (4.1)$$

➤ Izkoristek - c_p :

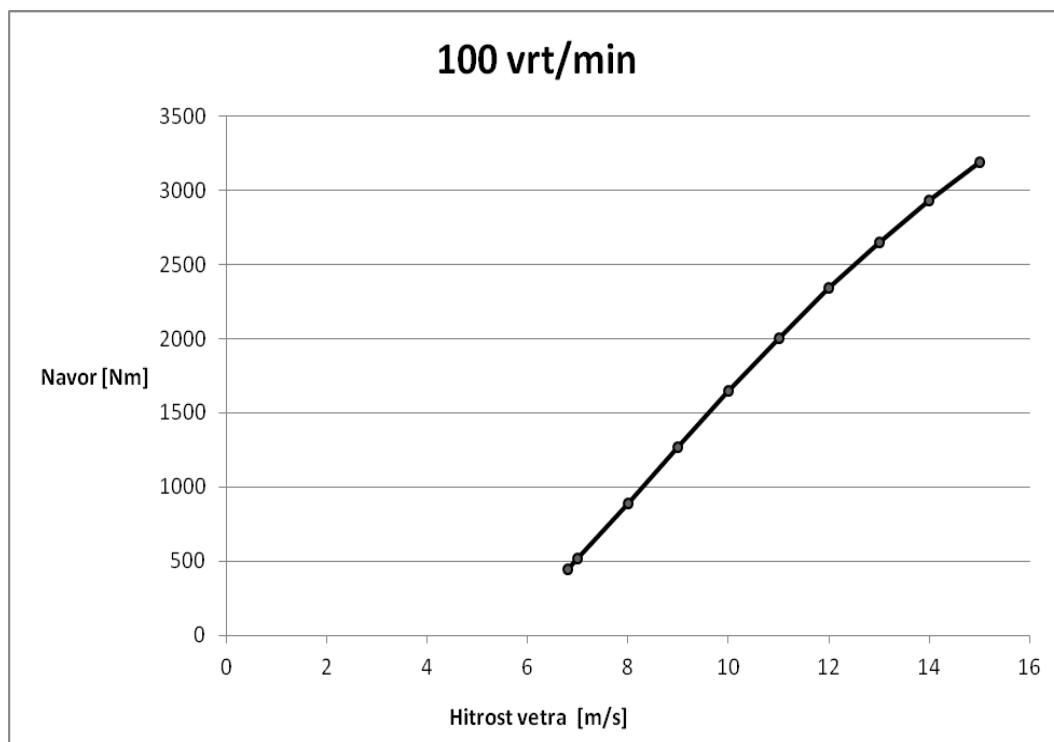
$$c_p = \frac{P}{0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot v^3} \quad (4.2)$$

➤ TSR - razmerje med obodno hitrostjo vrha lopatice in hitrostjo vetra:

$$TSR = \frac{\omega \cdot r}{v} \quad (4.3)$$

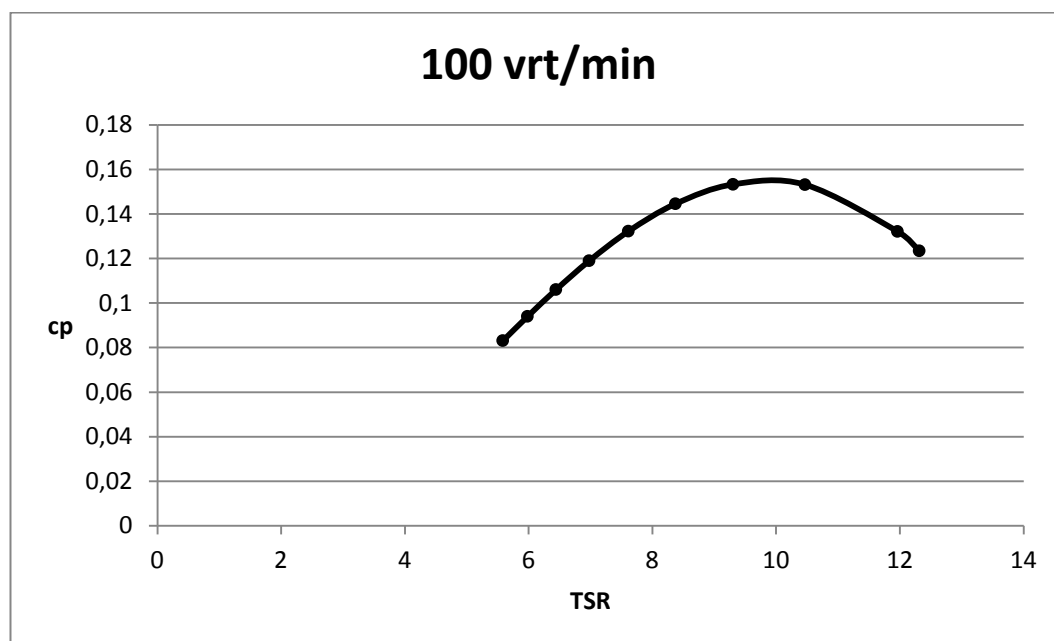
Tabela 4: Rezultati pri vrtilni frekvenci 100 vrt/min:

Hitrost vetra [m/s]	Navor [Nm]	Moč [W]	Izkoristek- c_p	TSR
6,8	441,6	4622,08	0,123456	12,31373
7	515,64	5397,032	0,132149	11,9619
8	892,05	9336,79	0,153154	10,46667
9	1271,28	13306,06	0,153294	9,303704
10	1644,78	17215,36	0,144583	8,373333
11	2002,83	20962,95	0,132275	7,612121
12	2339,46	24486,35	0,11901	6,977778
13	2650,86	27745,67	0,106064	6,441026
14	2935,23	30722,07	0,09403	5,980952
15	3192	33409,6	0,083138	5,582222



Slika 4.20: Karakteristika navora v odvisnosti od hitrosti vetra

Kot nam prikazuje zgornji graf (slika 4.20) vidimo, da s hitrostjo vetra narašča tudi navor. Ker pa vemo, da le-ta pri obratovanju obremenjuje gred in generator, ima vsaka vetrnica nazivno hitrost, pri kateri lahko obratuje.



Slika 4.21: Karakteristika izkoristka v odvisnosti od hitrostnega razmerja TSR

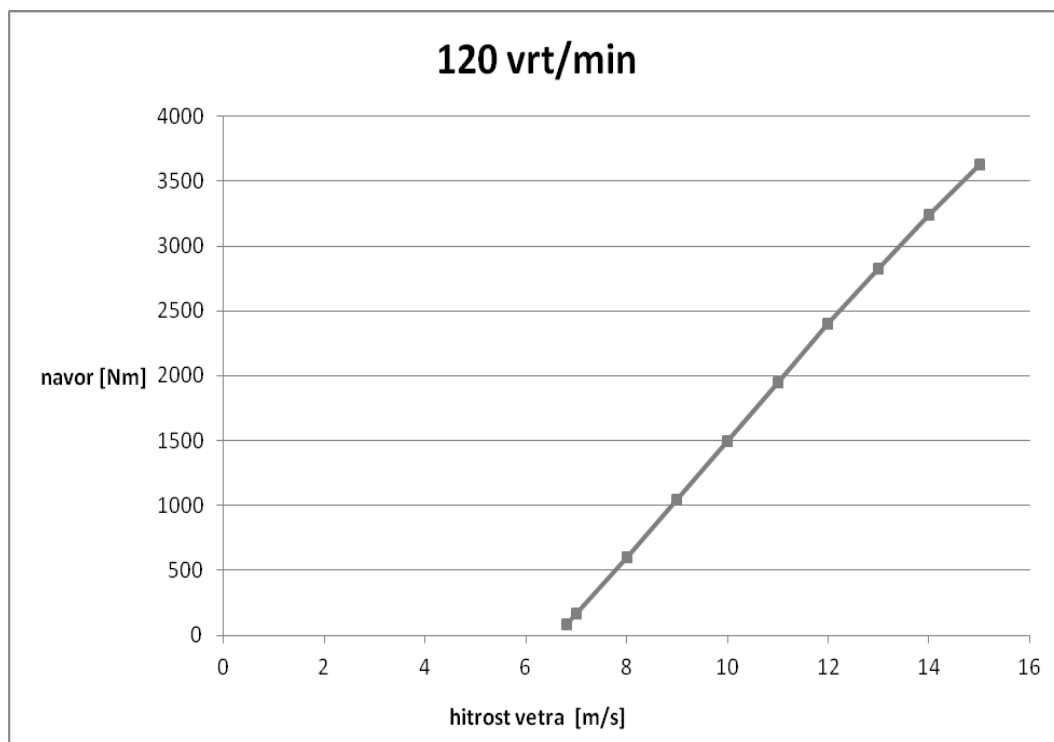
Vsaka vetrna turbina ima neko optimalno območje, v katerem obratuje optimalno. V našem primeru (slika 4.21) je optimalno območje pri razmerju hitrosti $TSR=10$, kjer je faktor izkoristka 0,155.

- **Vrtilna frekvenca 120 vrt/min**

Rezultati izračunov pri vrtilni frekvenci 120 vrt/min so prikazani na slikah 4.22 in 4.23 ter zbrani v tabeli 7.

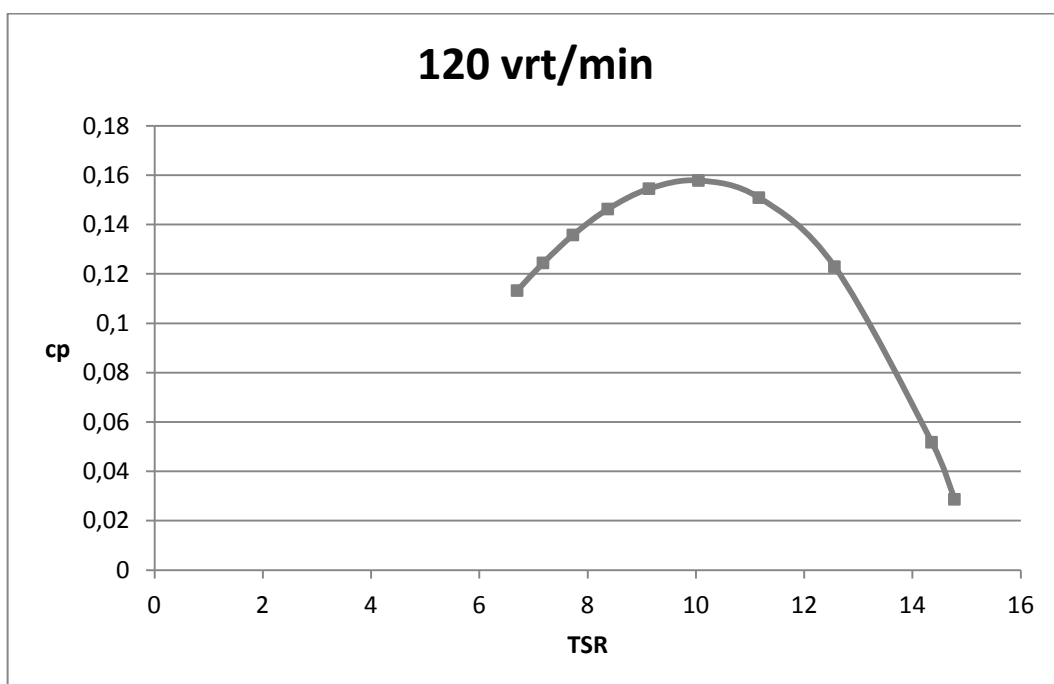
Tabela 5: Rezultati pri vrtilni frekvenci 120 vrt/min

Hitrost vetra [m/s]	Navor [Nm]	Moč [W]	Izkoristek- c_p	TSR
6,8	85,482	1073,654	0,028677	14,77647
7	168,4272	2115,446	0,051798	14,35429
8	596,724	7494,853	0,122941	12,56
9	1042,791	13097,45	0,15089	11,16444
10	1496,289	18793,39	0,157836	10,048
11	1949,79	24489,36	0,154526	9,134545
12	2396,19	30096,15	0,146275	8,373333
13	2827,83	35517,54	0,135773	7,729231
14	3237,3	40660,49	0,124449	7,177143
15	3623,1	45506,14	0,11324	6,698667



Slika 4.22: Karakteristika navora v odvisnosti od hitrosti vetra

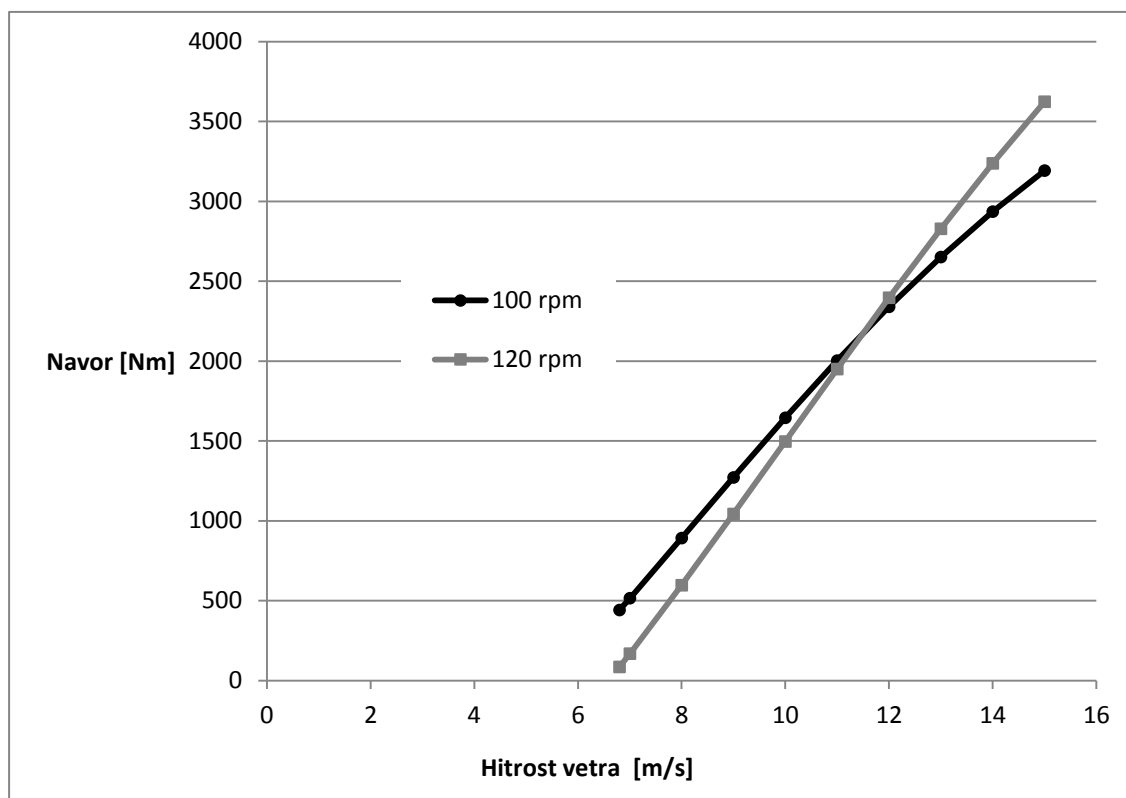
Krivulja navora s hitrostjo narašča. Enako se tudi v tem primeru z večanjem navora posledično povečuje moč.



Slika 4.23: Karakteristika izkoristka v odvisnosti od razmerja hitrosti TSR

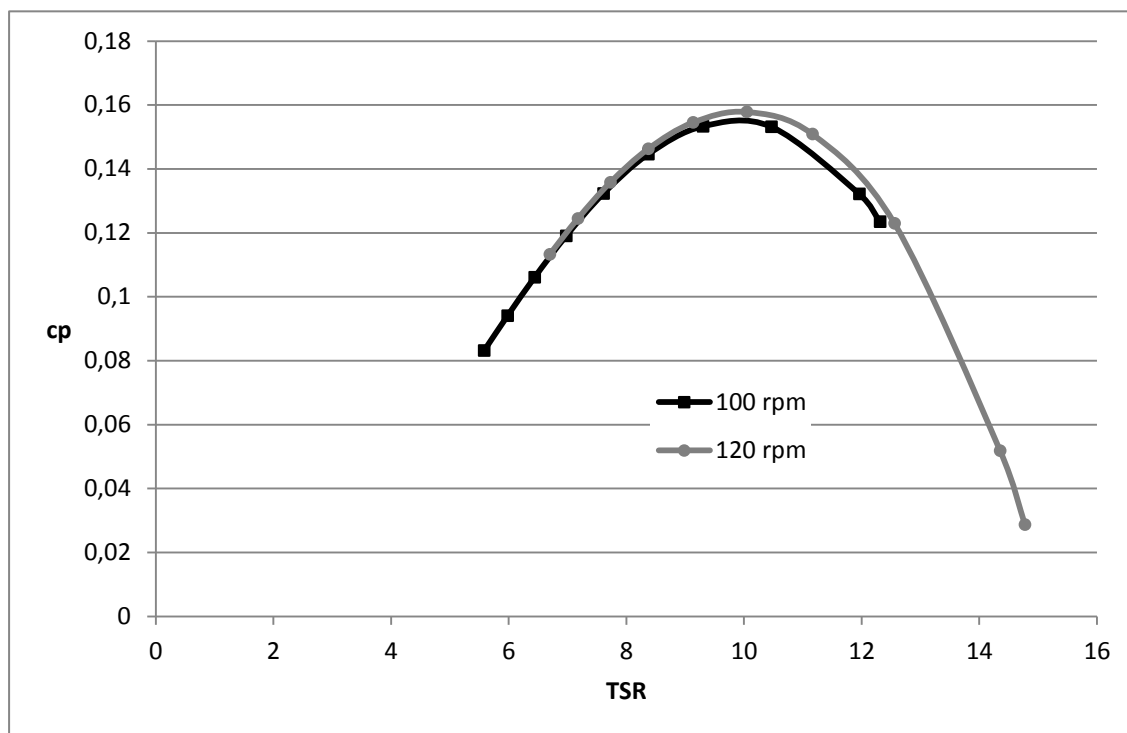
Pri vrtilni frekvenci 120 vrt/min (slika 4.23) je optimalno območje pri razmerju hitrosti TSR=11, kjer je faktor izkoristka 0,16.

- **Primerjava rezultatov pri obeh vrtilnih frekvencah**



Slika 4.24: Primerjava navora v odvisnosti od hitrosti vetra pri obeh vrtilnih frekvencah

Primerjava (slika 4.24) prikazuje, da je v navor na lopatici na začetku večji pri nižji vrtilni frekvenci, višji maksimalni navor na lopatico pa doseže višja vrtilna frekvenca.



Slika 4.25: Primerjava izkoristka v odvisnosti od obodne hitrosti rotorja

Tudi na zgornjem grafu (slika 4.25) opazimo, da doseže malo višje izkoristke višja vrtilna frekvenca.

5 SKLEP

Cilj magistrskega dela je bil napraviti numerično analizo vetrne turbine, ki nam bi podala realne rezultate. Najprej je bilo potrebno izdelati geometrijski model, ki je preproste oblike, lopatice nimajo možnosti nastavitve kota, da bi se prilagajale vetru vzdolž lopatice. Izdelava mreže predstavlja velik izziv, saj so bili rezultati navora s preredko mrežo nerealni in je bila potrebna poenostavitev geometrije na tretjinski model in izdelave različnih mrež, ki so bile različno zgoščene. Ugotovljeno je bilo, da je bila zadostna gostota mreže bistvenega pomena pri rešitvi problema za pravilno napoved navora na rotor. Izkaže se, da kljub temu, da je navor pravilno napovedan, tokovno polje še vedno zelo grobo rešeno, pri čemer bi bilo potrebno v volumnu območja za rotorjem mrežo bistveno zgostiti na velikosti elementov, kot so na lopatici.

Pri hitrosti vetra 15 m/s moč vetrne turbine pri 120 vrt/min znaša 45 kW, pri 100 vrt/min pa 34 kW. Glede na premer rotorja v primerjavi z komercialno uveljavljenimi turbinami je izračunana moč nižja, kar je glede na geometrijsko poenostavitve numeričnega modela (predvsem ravnih lopatic z ne optimalnim nastavnim kotom) in uporabo poenostavljenih numeričnih modelov opisa fizikalnega dogajanja na relativno redki mreži pričakovano odstopanje.

V prihodnosti bi bilo smiselno nadgraditi geometrijo vetrne turbine. Rotorske lopatice bi bilo potrebno zmodelirati tako, da bi bile zavite in bi se tako lahko prilagajale različni hitrosti vetra vzdolž lopatice. Prav tako bi bilo smiselno zgostiti računsko mrežo, predvsem za lopatico.

SEZNAM UPORABLJENIH VIROV

- [1] Ansys: "CFX 14.5 Help", Računalniški program
- [2] Hribernik Aleš: Obnovljivi viri energije, Maribor, 2010
- [3] Hriberšek Matjaž, Škerget Leopold: Računalniška dinamika tekočin, Fakulteta za strojništvo, Maribor, 2005. Dostop: http://iepoi.uni-mb.si/hribersek/Stud_gradivo/cfd-temp.pdf
- [4] http://sl.wikipedia.org/wiki/Vetrna_turbina
- [5] Predin Andrej: Vetrne elektrarne v Sloveniji, Fakulteta za energetiko, Maribor, 2009
- [6] Škerget Leopold: Mehanika tekočin, Tehniška fakulteta, Maribor, 1994.
- [7] Technical Application Papers No. 13, Wind power plants
- [8] Tiwari G.N., Ghosal M.K.: Fundamentals of renewable energy sources, Kopija, Oxford, 2007
- [9] Voršič Jože: Vetrne elektrarne, Laboratorij za energetiko, FERi UM. Dostop: <http://www.powerlab.uni-mb.si/Slo/Download/PRE/Vetrne.pdf>
- [10] Zadavec Matej: "Numerična analiza tokovnih razmer v mešalni posodi". Diplomsko delo, Maribor, 2004