



Perić, B., Svorcan, J., Peković, O., Simonović, A.<sup>1)</sup>

## NUMERIČKA ANALIZA AERODINAMIČKIH KARAKTERISTIKA ROTORA VETROTURBINE SA HORIZONTALNOM OSOM OBRRTANJA<sup>2)</sup>

### *Rezime*

*U ovom radu numerički je ispitivana vetroturbina sa horizontalnom osom obrtanja DTU 10MW. Izvršena je aerodinamička analiza referentnog rotora vetroturbine primenom metode elementa lopatice kao i metode konačnih zapremina pomoću Ansys FLUENT softverskog paketa. Kombinacijom ovih metoda omogućeno je dobijanje značajnih preliminarnih rezultata za projektovanje vetroturbina sa rotorima velikih prečnika.*

*Ključne reči: vetroturbine, rotor, metod elementa lopatice, CFD*

### 1. UVOD

Potreba za obnovljivim izvorima energije zauzima posebnu pažnju u poslednjih nekoliko decenija. Bitan obnovljiv izvor energije je energija vetra. Energija vetra se transformiše u mehaničku energiju pomoću vetroturbina. Mehaničkim spojem ostvarena je veza između vetroturbine i generatora. Generator transformiše mehaničku energiju u električnu. Sistem prenosa modernih vetroturbina je projektovan tako da imaju manje od 10% gubitaka dok je njihova aerodinamička efikasnost značajno povećana. Aerodinamička efikasnost vetroturbina od osamdesetih godina prošlog veka pa do danas povećana je sa 44% na 50% što je blizu teorijske granice koja iznosi 59%, prema Becovoj teoriji.

Razvojem različitih koncepata, vetroturbine se mogu podeliti na dva načina: 1) prema lokaciji na kojoj se koriste i 2) prema konstrukcionim karakteristikama. Prema lokaciji mogu biti: kopnene, na moru i vazdušne. Prema konstrukcionim karakteristikama dele se na: 1) vetroturbine sa horizontalnom osom obrtanja i 2) vetroturbine sa vertikalnom osom obrtanja[1].

Danas su najviše u upotrebi vetroturbine sa horizontalnom osom obrtanja. Najčešće se izrađuju sa dve ili tri lopatice ali za veće snage najčešće se koriste tri lopatice. Prednosti ovih vetroturbina su: velika snaga, veliki stepen iskorišćenja i mali moment pokretanja što doprinosi efikasnosti sistema. Nedostaci su: složena konstrukcija, skupo održavanje generatora na velikoj visini i skupo održavanje visokih stubova. Dimenzije i snaga savremenih komercijalnih vetroturbina kreću se od 75 KW sa prečnikom rotora od 17 m pa do 7.5 MW sa prečnikom rotora preko 125 m. Snage vetroturbinakoje se razvijaju kreću se od 10-20MW[2].

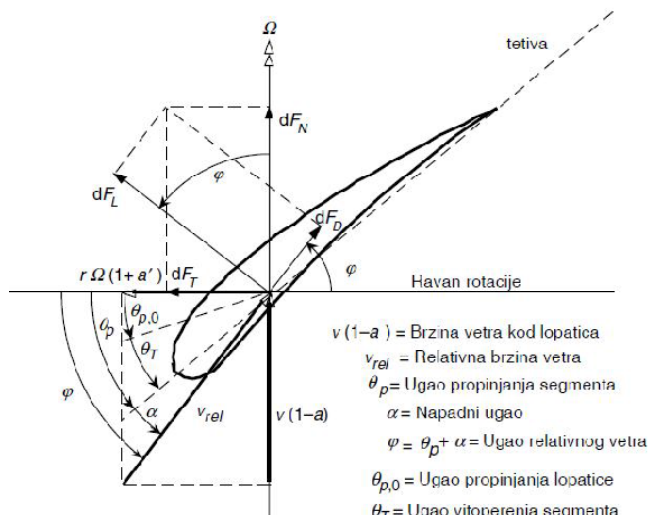
U proračunu aerodinamičkih opterećenja vetroturbina koriste se različiti aerodinamički modeli. Najčešće su u upotrebi sledeći modeli: BEM(Blade Element Momentum Theory-teorije zasnovane na promeni količine kretanja i momenta količine kretanja) model, vrtložni model, teorije idealnog diska i CFD (Computational Fluid Dynamics-proračunska dinamika fluida) model.

BEM model je predložen od strane Glauert-a, kombinovanjem teorije elementa lopatice i momentne teorije lopatice. Teorija elementa lopatice podrazumeva deljenje lopatice na više nezavisnih segmenata, gde se za svaki segment lopatice za odgovarajući lokalni aeroprofil izračunava koeficijent otpora i potiska. Sumiranjem sila uzgona i otpora aeroprofila kao i sile normalne i tangencijalne na ravan rotacije dobijaju se ukupne vrednosti za svaku silu. Uvođenjem aksijalnog indukcionog faktora  $a_i$  tangencijalnog indukcionog faktora  $a'$  u momentnu teoriju lopatice izračunavaju se indukovane brzine u aksijalnom i tangencijalnom

<sup>1)</sup> MSc Bojan Perić, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet u Beogradu, ([bperic@mas.bg.ac.rs](mailto:bperic@mas.bg.ac.rs)); dr Jelena Svorcan, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet u Beogradu, ([jsvorcan@mas.bg.ac.rs](mailto:jsvorcan@mas.bg.ac.rs)); dr Ognjen Peković, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet u Beogradu, ([opekovic@mas.bg.ac.rs](mailto:opekovic@mas.bg.ac.rs)); prof. dr Aleksandar Simonović, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet u Beogradu, ([asimonovic@mas.bg.ac.rs](mailto:asimonovic@mas.bg.ac.rs))

<sup>2)</sup> U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja koja se sprovode na projektu TR-35035, kod Ministarstva za prosvetu, nauku i tehnološki razvoj.

pravcu. Indukovane brzine utiču na napadni ugao lopatice pa stoga dolazi do direktne promene u proračunu aerodinamičkih opterećenja pomenute teorije, slika 1.



**Slika1.** Analiza geometrije lopatice sa horizontalnom osom obrtanja

Izvorni BEM model[3] ima nekoliko ograničavajućih faktora, ipak glavna ograničenja ove teorije su prevaziđena tako što su određene korekcije pozajmljene od helikoptera. Glavni nedostatak BEM modela je zanemarivanje efekta vrtložnog traga pri vrhu lopatice za indukovanu brzinu. Kako bi se korigovao ovaj nedostatak uvedene su različite korekcije. Najbolja slaganja sa eksperimentalnim rezultatima dao je Prantlov korekcionni faktor. Drugi nedostatak BEM modela je slučaj kada indukcioni faktor  $a$  dostigne vrednost veću od 0.4, gde momentna teorija prestaje da važi. U takvom slučaju se primenjuju nekoliko empirijskih modela kao što je Glauertov model, Buhlov model, Aerodinamički model i Spera model. Svi modeli pokazuju dobra slaganja sa eksperimentalnim rezultatima izuzev Spera model.

BEM model obezbeđuje rezultate visokog stepena preciznosti za kraće vreme proračuna u odnosu na ostale modele, prvenstveno kada je reč o kompletnim i pouzdanim aerodinamičkim podacima aeroprofila koji su korišćeni za lopaticu vetroturbine [4]. Iz tog razloga je BEM model korišćen.

Kako BEM model nemože da obezbedi detaljne informacije koje se odnose na vizuelizaciju i vrtložni trag, koji igraju bitnu ulogu u razvoju vetroturbine naročito u dizajnu i optimizaciji[5], razmatrani su drugi modeli.

CFD model sa razvojem računarske tehnologije poslednjih godina zauzima značajno mesto u tom pogledu. CFD model rešava hiljade jednačina kako bi obezbedio odgovarajuću vizuelizaciju oko lopatice. Takođe, jedna od prednosti CFD modela je mogućnost uvoženja 3D geometrije lopatice korišćenjem CAD alata u savremenim softverskim paketima za modeliranje.

Osnove matematičkog CFD modela su Navier-Stoksove jednačine. Za lopatice vetroturbine čija relativna brzina vetra značajno manja od brzine zvuka protok se može smatrati nestišljivim[6]. Za nestišljivo strujanje Navier-Stoksove jednačine su date formulama[7]:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla)u = -\nabla P + \vartheta \nabla^2 u \quad (1)$$

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (2)$$

Gde je  $u$  brzina strujanja,  $P$  je pritisaki  $\vartheta$  je koeficijent kinematske viskoznosti.

Prilikom rešavanja Navier-Stoksovih jednačina za turbulentno opstrujavanje vetroturbine CFD model omogućava korišćenje različitih modela kao što su k-epsilon, k-omega, SST model i Spalart-Allmaras model.

Osnovni nedostatak CFD modela je dugo vreme proračuna i zahtevan računarski resurs. Sa druge strane CFD model obezbeđuje precizne rezultate uključujući viskozne efekte i proračun složene geometrije. Iz tog razloga kako bi se otklonili nedostaci BEM modela iskorišćen je CFD model za proračun lopatice za jednu brzinu vetra uz korišćenje vizuelizacije za kvalitetan prikaz raspodele brzine i raspodele pritisaka duž lopatice. U radu su pomenuti modeli primenjeni na referentnu vetroturbinu DTU 10 MW [8].

Rad je koncipiran u sledećim koracima: uvod, model vetroturbine, numerička postavka, analiza rezultata i zaključak.

## 2. MODEL VETROTURBINE

Prema izveštaju za DTU 10MW vetroturbinu [8] dati su glavni parametri u tabeli 1.

**Tabela 1.** Glavni parametri vetroturbine DTU 10MW

Parametri	Vrednosti	Jedinica
Procenjena snaga vetroturbine	10	MW
Broj lopatica	3	-
Prečnik rotora	178,3	m
Nominalna brzina vetra	11,4	m/s
Nominalna ugaona brzina rotora	9,6	RPM

Geometrija lopatice uključuje aeroprofile iz FFA-W3 serije, počev od korena lopatice sa FFA-W3-600GF, FFA-W3-480GF, FFA-W3-360, FFA-W3-301, FFA-W3-241 pa do kraja lopatice sa NACA 0015.

## 3. NUMERIČKA POSTAVKA

### 3.1. BEM model

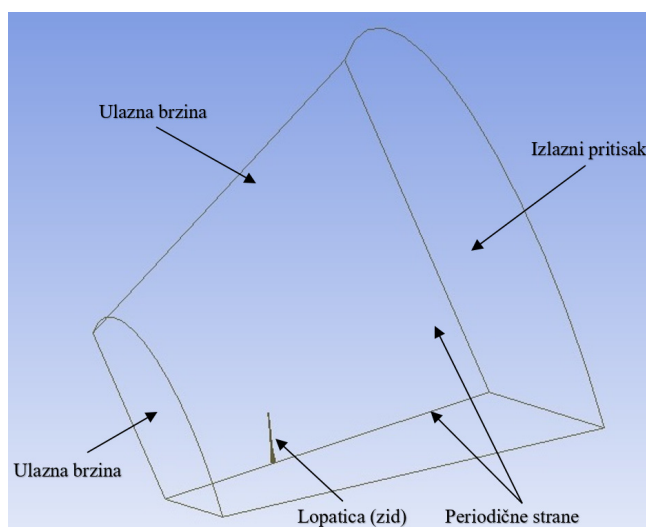
Za proračun BEM modelom korišćen je softverski paket QBlade. Ulazni podaci obuhvataju sve geometrijske parametre duž razmaha lopatice kao i broj lopatica. Aerodinamičke karakteristike aeroprofila za lokalne vrednosti Reynoldsovog broja proračunate su u opsegu napadnih uglova  $\alpha$  od  $-32^\circ$  do  $+32^\circ$  metodom panela a potom ekstrapolirane u opsegu od  $-180^\circ$  do  $+180^\circ$ . Za sve aeroprofile pri određivanju polara pretpostavljen je Mahov broj  $M = 0$ , tj. zanemaren je uticaj stišljivosti.

Proračun aerodinamičkih performansi vetroturbine izvršen je za različite kombinacije brzine vetra u opsegu od 5m/s do 25 m/s, ugaone brzine rotora u opsegu 6 do 9.6 RPM i ugla zakretanja lopatice u opsegu od  $2^\circ$  do  $22^\circ$ .

Na osnovu tih ulaznih podataka dobijeni su rezultati koeficijenta snage ( $C_p$ ), koeficijenta potiska ( $C_t$ ), potisaka ( $T$ ) i snaga ( $P$ ), koji su upoređeni sa podacima referentne vetroturbine. Dobijeni rezultati su prikazani na slici 3.

### 3.2 CFD model

Za proračun CFD modelom, korišćenjen je kruti model lopatice u softverskom paketu ANSYS FLUENT [10]. Geometrija lopatice je uvežena kao 3D model i kreiranje solid u mm. Kako je geometrija vetroturbine osno simetrična, potrebno je modelirati samo jednu trećinu geometrije kontrolne zapremine odnosno vršiti proračun strujanja duž strujne cevi čiji je poprečni presek kružni isečak ugla  $120^\circ$ . Ovim pristupom se značajno smanjuje vreme proračuna. Vetroturbina je simetrična u odnosu na centar rotacije, zbog čega je korišćen model jedne lopatice u segmentu radijalne strujne cevi sa periodičnim stranama u cilju smanjenja vremena proračuna. Proračunski domen i granice za model su dati na slici 2.



**Slika 2.** Proračunski domen i granični uslovi za CFD model

Proračunski domen strujne cevi definisan jeradijusom od 260 mm sa odstojanjem 160 mm od lopatice i radijusom od 520 mm sa odstojanjem 320 mm od lopatice. U ovom slučaju brzina vetra, ugao zakretanja lopatice i ugaona brzina iznose: 11 m/s, 0° i 8.836 rpm. Za proračunski domen formirana je hibridna mreža. Hibridna mreža je kombinacija strukturirane i nestrukturirane mreže. Mrežom je definisan granični sloj oko geometrije lopatice. Kako bi proračun bio precizan i brži, veličine ćelija za proračunski domen je različit u kontrolnoj zapremini. U tom smislu postoje dva načina kontrole mreže, kao globalna i lokalna. Za globalnu kontrolu mreže definisana je srednja veličina ćelije koja se odnosi na centralni deo proračunskog domena. Za lokalnu kontrolu mreže definisano je: poklapanje čvorova na periodičnim stranama, veličina ćelije na lopatici, geometrija ćelije graničnog sloja i manja zapremina oko lopatice.

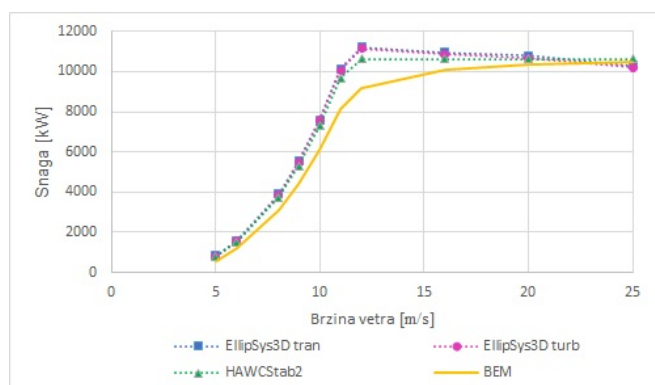
Mreža proračunskog domena predstavljena je tetraedrima i heksaedrima za granični sloj. Minimalna veličina ćelije za proračunski domen na globalnom nivou je 0.2mm a maksimalna 57 mm. Mreža se sastoji iz 5093246 elemenata.

Korišćen je turbulentni model  $k-\omega$  SST [9] u podzvučnoj zoni i pri tome su uzeti parametri za vazduh gde gustina fluida iznosi  $1.225\text{kg/m}^3$ , a viskoznost  $\mu = 1.78406\text{e-}05$ . Proračun je ograničen na 2000 iteracija.

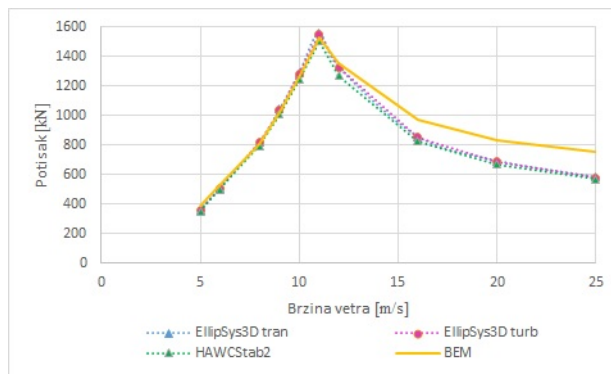
## 4. ANALIZA REZULTATA

### 4.1. Primena BEM modela

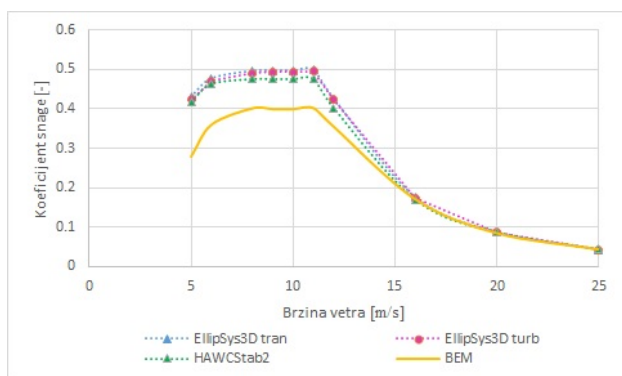
Na slici 3, prikazano je poredenje rezultata referentne vetroturbine sa rezultatima dobijenim primenom BEM modela.



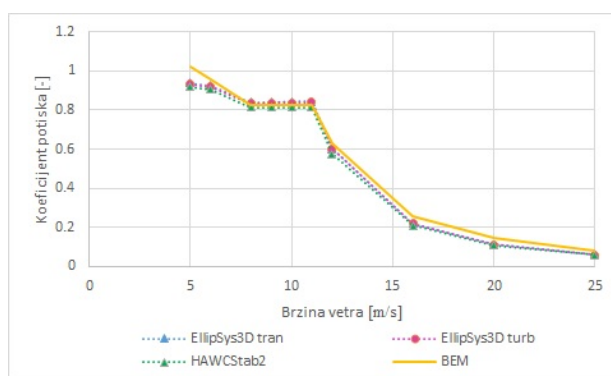
Snaga u funkciji brzine vetra poredjena sa referentnom lopaticom i BEM modelom



Potisak u funkciji brzine vetra poredjena sa referentnom lopaticom i BEM modelom



Koef. snage u funkciji brzine vetra poredjena sa referentnom lopaticom i BEM modelom



Koef. potiska u funkciji brzine vetra poredjena sa referentnom lopaticom i BEM modelom

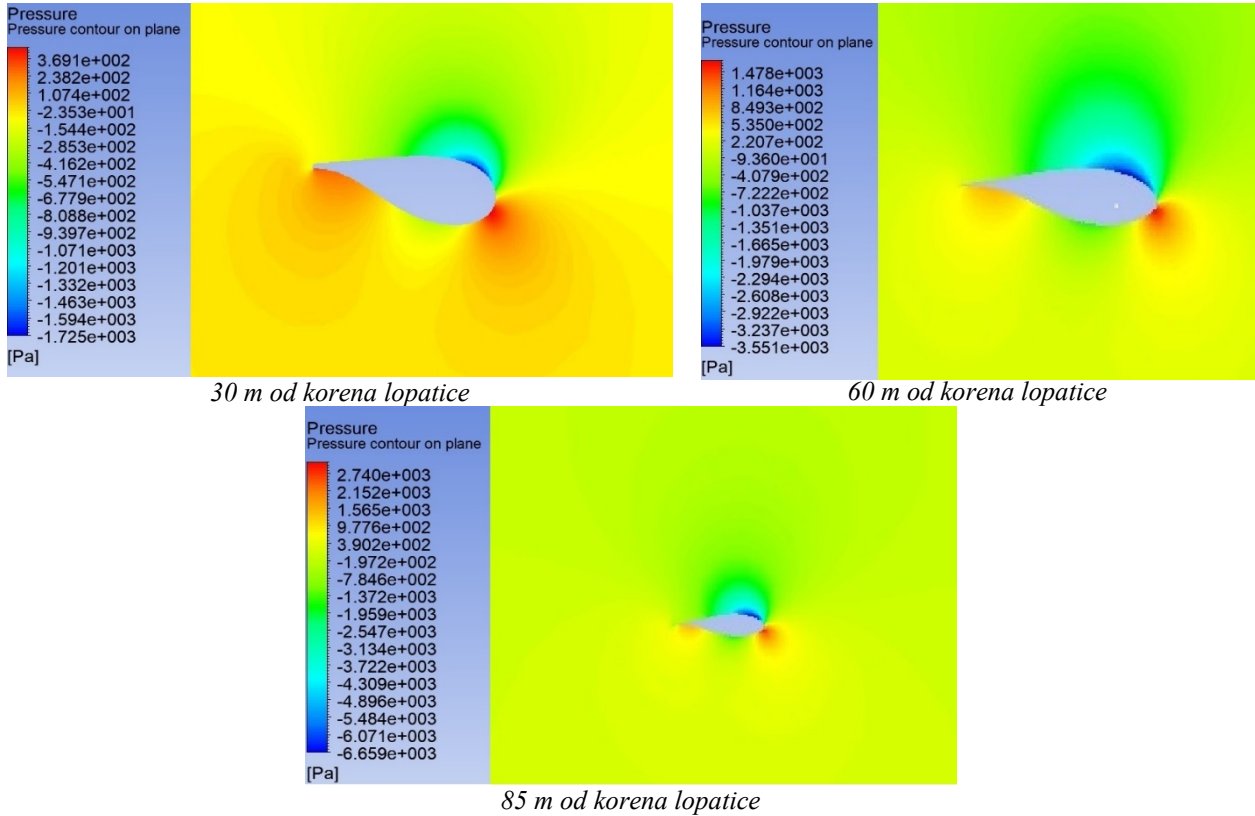
**Slika 3.** Poređenje rezultata dobijenih BEM modela sa rezultatima referentne lopatice

Na slici 3, prikazano je poredenje rezultata referentne vetroturbine sa rezultatima dobijenim primenom BEM modela. Analize sa rasponom brzina od 5 m/s do 25 m/s urađene su u funkciji snage, potiska, koeficijenta snage i koeficijenta potiska kako bi se pronašao radni režim lopatice za određenu brzinu. Dijagram snage lopatice i koeficijenta snage pokazuje da se javljaju odstupanja za brzinu vetra od 11 m/s do

16 m/s, ne veće od 5%. Dijagram potiska i koeficijenta potiska pokazuju manja odstupanja za radni režim lopatice do 11.4 m/s.

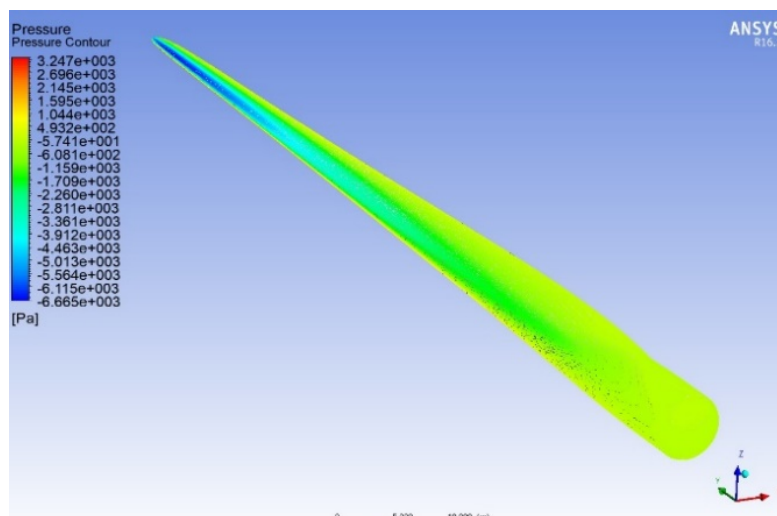
#### 4.2. Primena CFD modela

Proračun CFD modelom prikazuje dobijenu raspodelu pritisaka oko aeroprofila u ravnima duž lopatice na odstojanju od 30 m, 60 m i 85 m mereno od korena lopatice, slika 4.



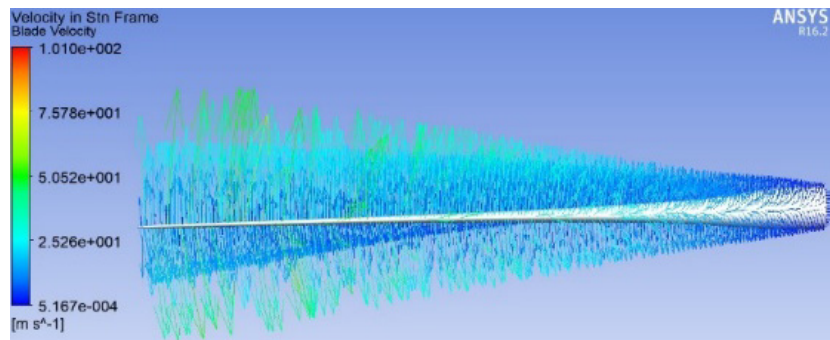
*Slika 4. Raspodela pritiska u ravni*

Na slici 5, može se videti da lokalna brzina duž lopatice raste sa povećanjem prečnika lopatice. Maksimalna dobijena brzina je 65 m/s koja se nalazi pri vrhu lopatice za pitch ugao propinjanja (pitch angle=0°). Dobijena snaga za brzinu vetra  $v=11\text{m/s}$  iznosi 9854.60 KW što predstavlja odstupanje od 2.8% za dobijenu snagu prema zvaničnom izveštaju za referentnu vetroturbinu sa horizontalnom osom obrtanja DTU 10 MW. Na slici 6, prikazana je raspodela brzina duž lopatice za brzinu vetra 11 m/s.



*Slika 5. Raspodela pritiska duž lopatice*





**Slika 6.** Raspodela brzina duž lopatice za brzinu vetra 11 m/s

## 5. ZAKLJUČAK

Ovaj rad pokazuje dobijanje brzih preliminarnih rezultata snage, potiska, koeficijenta snage, koeficijenta potiska i raspodela pritisaka duž lopatice vetroturbinе sa velikim prečnikom rotora. Iz dobijenih rezultata izvedeni su sledeći zaključci:

- Rezultati pokazuju da je radni režim vetroturbinе između 11 m/s i 12 m/s;
- BEM model ne uključuje viskoznost fluida, dok CFD model taj nedostatak otklanja sa dobijenim rezultatima koji su manji od 2.8% u odnosu na rezultate iz izveštaja za referentnu vetroturbinu;
- Pokazano je da se BEM i CFD modeli dopunjuju u preciznosti i tačnosti dobijenih rezultata;
- BEM model pokazuje da dobijene aerodinamičke karakteristike lopatice vetroturbinе prate referentne vrednosti sa odstupanjem koja nisu veća od 5%;
- Procentualna odstupanja kod sile potiska su manja nego kod snage za radni režim vetroturbinе koji potvrđuje proračun CFD modelom;

## 6. LITERATURA

- [1] Manwell, J. F., McGowan, J. G., and Rogers, A. L.: *Wind energy explained: theory, design and application*, John Wiley and Sons, 2010.
- [2] Premalatha, M., Tasneem A., and S. A. Abbasi: *Wind energy: Increasing deployment, rising environmental concerns*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol.31, pages270-288, 2014.
- [3] Glauert, H.: *Airplane propellers*, Aerodynamic theory, Springer, Berlin, Heidelberg, pages 169-360, 1935.
- [4] Wang, L., Liu, X., and Kolios, A.: *State of the art in the aeroelasticity of wind turbine blades: Aeroelastic modelling*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 64, pages 195-210, 2016.
- [5] Tu, Jiyuan, Guan-HengYeoh, and Chaoqun Liu, *Computational fluid dynamics: a practical approach*, Butterworth-Heinemann, 2018.
- [6] Sanderse, B.: *Aerodynamics of wind turbine wakes*, Energy Research Center of the Netherlands (ECN), ECN-E-09-016, Petten, The Netherlands, Tech. Rep 5, no. 15: 153, 2009.
- [7] Quartapelle, Luigi.: *Numerical solution of the incompressible Navier-Stokes equations*. vol. 113. Birkhäuser, 2013.
- [8] Bak, C., Zahle, F., Bitsche, R., Kim, T., Yde, A., Henriksen, L. C, Natarajan, A., and Hansen, M.: *Description of the DTU 10 MW Reference Wind Turbine*, DTU Wind Energy Report-I-0092, 2013.
- [9] Menter, F. R.: *Zonal two-equation  $k-\omega$  models for aerodynamic flows*, AIAA paper 93-2906, 1993.
- [10] INC, A. F.: *Fluent 15.0, Help-Theory guide*, Fluent Inc., 2012.

**Perić, B., Svorcan, J., Peković, O., Simonović, A.**

## NUMERICAL ANALYSIS OF AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF AN HORIZONTAL AXIS WIND TURBINE ROTOR

**Abstract:** In this paper the DTU 10MW HAWT was tested. An aerodynamic analysis of the reference rotor wind turbine was performed using the blade element method as well as finite volume methods using the Ansys FLUENT software package. This method provided a procedure which is determined by obtaining the preliminary fast results of the design of wind turbines with rotors of large diameters.

**Keywords:** wind turbines, rotor, Blade Element Method, CFD