

Jelena SVORCAN, Slobodan STUPAR, Zorana POSTELJNIK,
Ognjen PEKOVIĆ, Srđan TRIVKOVIĆ
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd

UDC: 621.311.24.001.573

Numerička analiza strujanja oko vetroturbine sa vertikalnom osom obrtanja pri promenljivoj brzini vetra

SAŽETAK

U najvećem broju sprovedenih eksperimentalnih i numeričkih ispitivanja vetroturbina sa vertikalnom osom obrtanja njihove performanse merene su ili određivane u donekle veštačkim uslovima. Naime, prilikom merenja u aerotunelu, ugaona brzina rotora vetroturbine ili brzina vetra definisane su kao nepromenljive veličine. Sa druge strane, kod numeričkih ispitivanja najčešće se zadaju obe ove vrednosti pa se na osnovu njih i strujne slike oko rotora određuje moment u odnosu na osu obrtanja, a potom i raspoloživa snaga. U realnosti, tokom rada vetroturbine, situacija je veoma drugačija. Ovim radom predstavljena je nešto drugačija metodologija numeričke procene performansi vetroturbine koja podražava njen realni rad na terenu i može poslužiti kao dobra polazna tačka za planiranje eksperimenta.

Problem opstrujavanja posmatran je kao dinamički sa promenljivim graničnim uslovima. Nominalna vrednost intenziteta brzine menjana je po stepenastom sinusoidnom zakonu u realnom vremenu da bi se prošlo kroz više radnih režima. Intenzitet stvarne brzine vetra računat je slučajnim izborom ali tako da se nije mogao razlikovati više od 25% od trenutne nominalne vrednosti. Amplituda i učestanost promene brzine vetra su varirane. Ukupni moment u odnosu na osu obrtanja računat je iz normalnih i tangencijalnih napona koji se javljaju po površini lopatica. Potom su određivane vrednosti ugaonog ubrzanja i ugaone brzine rotora. Promena ugaone brzine kontrolisana je tako da odgovara generatoru i/ili reduktoru koji takođe čine sastavni deo ovakvog sistema.

Proračuni su vršeni u komercijalnom softverskom paketu ANSYS FLUENT uz implementaciju određenih korisničkih funkcija kojima su regulisane promenljive veličine. Rezultati proračuna obuhvataju reakciju vetroturbine sa vertikalnom osom obrtanja na promenljivu brzinu vetra u realnom vremenu i procenu njenih performansi. U tom smislu, ovakva studija može biti veoma korisna za unapređenje i verifikaciju numeričkog modela, planiranje i pripremu eksperimenta ili razvoj upravljačkog aparata ili drugih elemenata vetroturbine.

Ključne reči: vetroturbine, proračunska dinamika fluida, nestacionarni uslovi, simulacija terenskog ispitivanja

NUMERICAL ANALYSIS OF FLUID FLOW AROUND VERTICAL-AXIS WIND TURBINE UNDER UNSTEADY WIND CONDITIONS

ABSTRACT

Usually, when performing an experimental or numerical investigation of fluid flow around a vertical-axis wind turbine, the performances are measured or determined in somewhat artificial conditions. During wind tunnel measurements either angular speed of the rotor or wind speed are kept constant. On the other hand, when performing numerical computations, the most usual approach is to define both of these quantities and then determine the torque around the rotation axis as reference and ultimately, the available power. However, the real situation is different. This paper presents a modified method of determining aerodynamic performances of a wind turbine that simulates its functioning in reality and can serve as a good starting point when planning an experimental research.

The fluid flow was considered highly dynamic with changeable boundary conditions. The nominal value of wind speed was varied according to the step sine law in real-time to cover more working regimes. The real wind speed was calculated by random choice but so that it could not be different from the current nominal value by more than 25%. The amplitude and frequency of wind speed change were also varied. The total torque at the central shaft was computed from normal and tangential stresses along the surface of the blades. From that value, the values of angular acceleration and speed of the rotor were determined. The change in angular speed was also controlled according to the accompanying generator and/or gear that also form a part of this system.

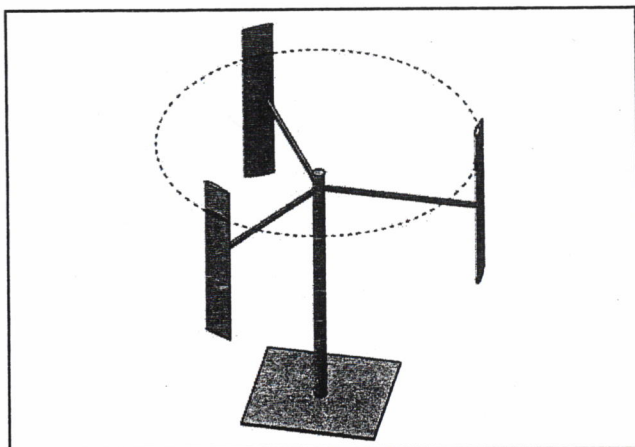
The computations were performed in the commercial software package ANSYS FLUENT with the implementation of several user-defined functions that defined the change of the variables. The obtained results include the reaction of the vertical-axis wind turbine to the unsteady wind conditions in real-time and an estimation of its aerodynamic performance. Therefore, this kind of investigation can be very useful for further adjustment and verification of the numerical setting, planning and preparation of the experiment or development of the control tool or subsequent elements of the wind turbine.

Keywords: wind turbines, CFD, unsteady wind conditions, field-test simulation

1. Uvod

U sled velike potrebe savremenog društva za novim izvorima čiste i isplative energije, različiti tipovi ispitivanja vetroturbina (pretvarača kinetičke energije vetra u električnu) su u proteklih par decenija veoma rasprostranjeni i popularni. Vetroturbine načelno možemo podeliti na one sa horizontalnom i vertikalnom osom obrtanja. Iako je većina istraživanja usmerena ka razvoju i unapređenju prvog tipa, drugi tip vetroturbina je takođe interesantan. Zbog kombinacije osobina kao što su: jednostavna konstrukcija, ekonomičnost, mogućnost rada i pri nižim brzinama vetra promenljivog pravca itd. vetroturbine sa vertikalnom osom obrtanja danas predstavljaju izvor energije sa mnogo potencijala prvenstveno namenjen malim potrošačima [1-7].

Iako je ovakva vetroturbina jednostavne konstrukcije, *slika 1*, njena aerodinamička analiza je veoma kompleksna. Strujanje je izrazito nestacionarno i u toku jedne rotacije lopatica prolazi kroz širok opseg napadnih uglova. Iz tih razloga postoji veliki



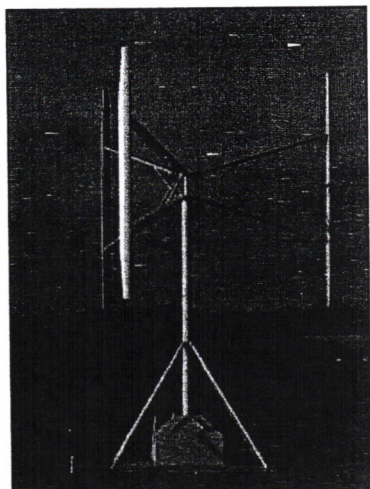
Slika 1. - Primer vetroturbine sa vertikalnom osom obrtanja. Isprekidanom linijom obeležena je putanja lopatica tokom jedne rotacije

broj proračunskih modela različite složenosti koji se aktivno koriste u početnim fazama projektovanja [1]. Konačna verifikacija ostvaruje se eksperimentalno, u aerotunelu, a potom i na terenu pod realnim radnim uslovima [2-7].

Jedan od osnovnih izvora grešaka tokom eksperimentalnih i numeričkih ispitivanja vetroturbina sa vertikalnom osom obrtanja jeste činjenica da se ona najčešće sprovode u stacionarnim uslovima - prilikom merenja u aerotunelu, ugaona brzina rotora vetroturbine ili brzina vetra definisane su kao nepromenljive veličine. Aerodinamičke performanse tako određene relativno gube na opštosti. Sa druge strane, kod numeričkih ispitivanja najčešće se zadaju obe ove vrednosti pa se na osnovu njih i strujne slike oko rotora određuje moment u odnosu na osu obrtanja, a potom i raspoloživa snaga. U realnosti, tokom rada vetroturbine, situacija je veoma drugačija. Ovim radom predstavljena je nešto drugačija metodologija numeričke procene performansi vetroturbine koja podražava njen realni rad na terenu i može poslužiti kao dobra polazna tačka za verifikaciju numeričkog modela, planiranje eksperimenta ili razvoj upravljačkog aparata vetroturbine.

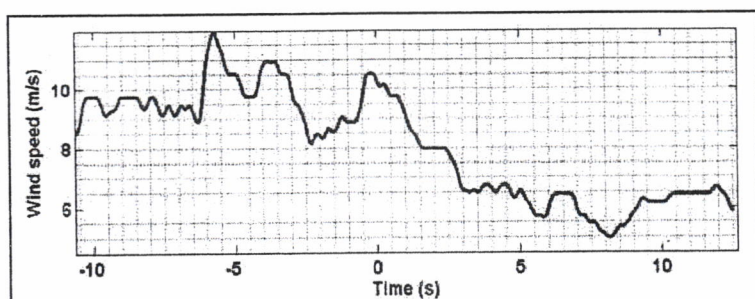
2. POLAZNI MODEL

Predstavljenu metodologiju je u prvom koraku potrebno na neki način proveriti pa su rezultati numeričkih eksperimenata poređeni sa rezultatima realne vetroturbine koja je postavljena u blizini Upsale u Švedskoj, *slika 2*. Detaljniji opis konstrukcije i eksperimenta moguće je naći u [2], a ovde su navedene samo neke od osnovnih karakteristika vetroturbine. Nominalna snaga vetroturbine je 12kW pri brzini vetra od 12m/s. Rotor je prečnika 6m i visine 5m. Sastoji se iz tri ravne lopatice aeroprofila NACA 0021 i tetive 0,25m. Nominalna ugaona brzina rotora iznosi 127obr/min.

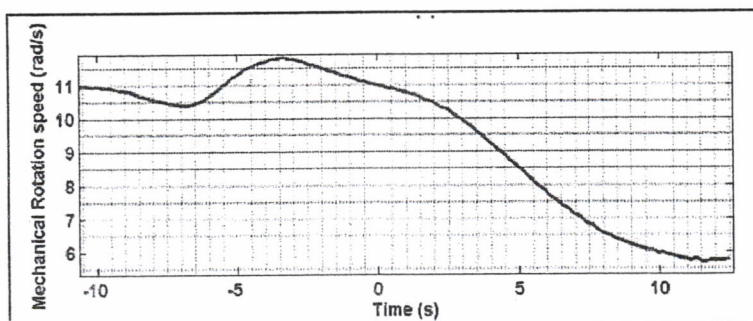


Slika 2. - Vetroturbina snage 12kW izvedena na Univerzitetu u Upsali, Švedska, preuzeto iz [2]

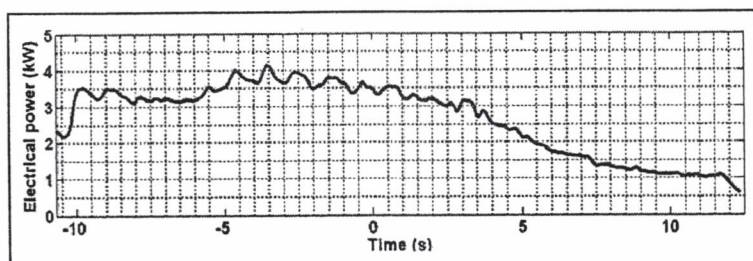
Slike 3-5, preuzete iz [2], ilustruju izrazitu dinamičnost radnih uslova kao i relacije između osnovnih parametara vetroturbine. Na slici 3 prikazan je primer promene brzine vetra u vremenu, dok slike 4 i 5 predstavljaju odziv vetroturbine na takve spoljašnje uslove u obliku ugaone brzine rotora i proizvedene električne energije.



Slika 3. - Brzina vetra, preuzeto iz [2]



Slika 4. - Ugaona brzina rotora, preuzeto iz [2]



Slika 5. - Snaga vetroturbine, preuzeto iz [2]

3. NUMERIČKA POSTAVKA

Vršene su uprošćene, ravanske numeričke analize strujnog polja oko modela vetroturbine čiji geometrijski parametri odgovaraju polaznom modelu. Za potrebe proračuna, formirana je struktuirana dvodimenzion-

alna mreža koja sadrži približno 40000 elemenata. Mreža je podeljena na dve oblasti - rotor (kružnog oblika, oko lopatica) i stator (preostali deo proračunskog domena). Oko lopatica je formiran granični sloj čija je bezdimenziona udaljenost od zida manja od 1. Po celom domenu promena veličine ćelija po radialnom pravcu nije prelazila 20%. Krajnje granice domena (statora) postavljene su na udaljenosti 50 puta većoj od poluprečnika rotora vetroturbine. Usvojena veličina i gustina mreže su rezultat kompromisa između ukupnog vremena trajanja proračuna i validnosti numeričkih rezultata. Predstavljenu proceduru moguće je koristiti i na značajno finijim proračunskim modelima.

Numerički proračuni strujnog polja vršeni su u komercijalnom programskom paketu ANSYS FLUENT 14.0 kojim se osnovne jednačine održanja mase, količine kretanja i energije rešavaju metodom konačnih zapremina. Za zatvaranje sistema jednačina korišćen je dvojednačinski turbulentni model $k\omega$ -SST koji daje dobre rezultate pri opstrujavanju aeroprofila u opštem slučaju. Posmatrano strujanje je nestacionarno i unutrašnji deo mreže rotira. Na spoljašnjoj granici definisana je promenljiva ulazna brzina vetra kao i dve potrebne turbulentne veličine.

Uobičajena numerička postavka (kojom se rešava ovaj tip problema) unapređena je da bi bila što sličnija realnom radu vetroturbine. Nominalna vrednost intenziteta brzine vetra menjana je po stepenastom sinusoidnom zakonu u realnom vremenu da bi se prošlo kroz što veći broj različitih radnih režima. Stvarna brzina vetra računata je iz nominalne vrednosti ali tako što se razlikovala za neku slučajnu vrednost - slično amplitudi oscilovanja brzine. Po završetku proračunskog koraka, prolazilo se po spoljašnjim površinama lopatica i iz vrednosti normalnih i tangencijalnih napona na njihovoj površini računata je trenutna vrednost ukupnog momenta M_R u odnosu na osu rotacije. Na osnovu te i zadate vrednosti momenta inercije J_0 , izračunate su vrednosti ugaonog ubrzanja rotora α , a potom i priraštaj ugaone brzine $\Delta\omega$. Ugaona brzina može da raste do unapred zadate nominalne vrednosti (koja je u realnosti određena generatorom i/ili reduktorom), nakon čega se održava na toj konstantnoj vrednosti (jedan od načina zaštite vetroturbine od jakih ili iznenadnih naleta vetra).

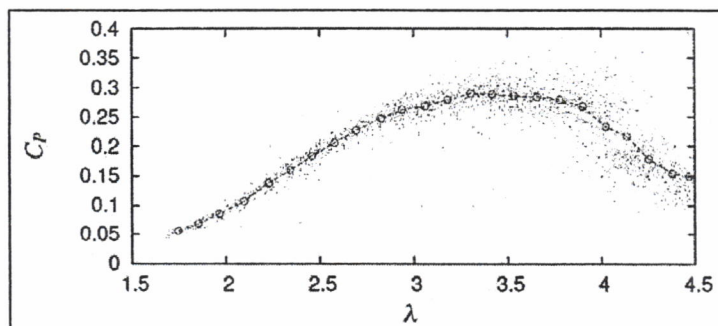
Ova modifikacija implementirana je u proračun putem korisničkih funkcija napisanih u C-u, a koje su kompajlirane u okviru ANSYS FLUENT-a. Nova vrednost ugaone brzine rotora računata je u svakom vremenskom koraku. Da bi se procenilo sa kolikom

tačnošću je moguće simulirati odziv vetroturbine u realnom vremenu na promenljive spoljašnje uslove razmatrane su različite vrednosti perioda promene nominalne vrednosti brzine vetra, T , kao i različite vrednosti maksimalne relativne amplitude, $(U_{amp,rel})_{max}$, i relativne učestanosti promene stvarne brzine vetra, f_{rel} . Relativna amplituda oscilovanja brzine predstavlja odnos fluktuacije brzine (slučajni broj) i nominalne vrednosti brzine. Slično, relativna učestanost promene brzine predstavlja odnos učestanosti obrtanja rotora vetroturbine i učestanosti promene fluktuacionog dela brzine.

Ovakva postavka je numerički zahtevnija i nestabilnija od uobičajene (kvazi-stacionarne) pa je korišćen kuplovan solver (koji uporedo rešava jednačine strujanja). Prostorne diskretizacije izvršene su šemama drugog, a vremenska šemom prvog reda. Kuranov broj je iznosio 20 sve vreme proračuna. Vršeno je 10 iteracija po jednom vremenskom koraku.

4. REZULTATI

Koeficijent snage opisane, realne vetroturbine zabeležen tokom eksperimentalnog ispitivanja prikazan je na slici 6, [3]. Svaka tačka odgovara radnom intervalu od 10min. Ovde je prikazani dijagram korišćen za ocenu kvaliteta numeričkih rezultata.



Slika 6. - Izmereni koeficijent snage vetroturbine, preuzeto iz [3]

Spomenuto je da su određeni parametri promenljivosti ulaznog polja brzine varirani, pa su simulacije predstavljene u obliku 5 različitih slučajeva čije su karakteristike date u tabeli 1. Maksimalna relativna amplituda promene brzine znači da se fluktuacioni deo brzine ne može razlikovati od nominalne vrednosti brzine za više od zadatog ograničenja (10% ili 25%). Relativna učestanost intenziteta 1 znači da je vrednost brzine tokom jedne rotacije vetroturbine stalna. Na isti

Tabela 1. - Razmatrani slučajevi - radni režimi

Slučaj	$(U_{amp,rel})_{max}$	f_{rel}	T [s]	Slike
1	10%	1	30	7,8
2	25%	1	30	9,10
3	10%	5	30	11,12
4	10%	1	15	13,14
5	10%	0,167	15	15,16

način, ako je $f_{rel} = 5$ brzina vetra se ne menja tokom 5 rotacija, a ako je $f_{rel} = 0.167$ brzina vetra se menja na 60° ugaonog pomeraja vetroturbine. Manja vrednost perioda promene nominalne vrednosti brzine T (15s u odnosu na 30s) je probana da bi se ustanovilo da li vetroturbina zaista i brže reaguje.

Proračunate reakcije vetroturbine na promenljivu brzinu vetra u realnom vremenu i odgovarajuće zavisnosti koeficijenta snage od koeficijenta rada prikazane su na slikama 7-16. Može se primetiti da ovi grafici sada više podsećaju na rezultate sakupljene prilikom eksperimenata [2-7]. Prikazani koeficijenti snage korigovani su polu-empirijskim popravnim faktorom kojim su obuhvaćeni uticaji prostornog strujanja, strujanja oko krajeva lopatica, postojanja centralnog vratila itd, a koje nije bilo moguće razmatrati ovakvim numeričkim modelom.

Viša vrednost relativne amplitude promene brzine rezultuje nestabilnijim izlaznim signalom - ugaonom brzinom rotora (slike 6 i 8), a time i većom raspršenošću koeficijenta snage (slike 7 i 9).

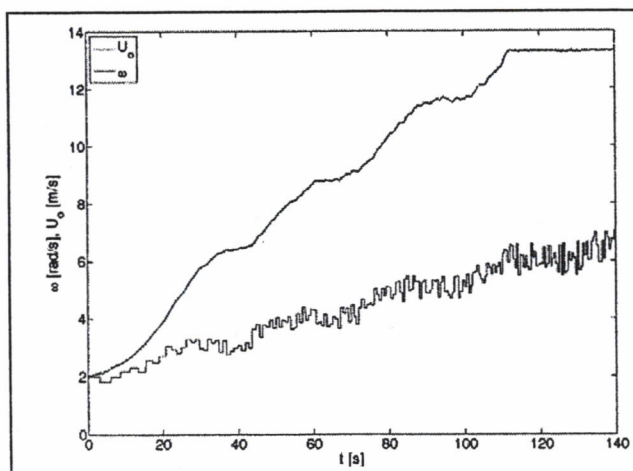
Sa druge strane, veća relativna učestanost znači stalniju vrednost ulazne brzine. Ako je fluktuacija brzine negativna može doći do značajnijeg usporenja vetroturbine, slika 10. Kako ovaj slučaj najviše liči na uobičajeni pristup, može se primetiti i da je skup vrednosti koeficijenta snage prilično grupisan (da je ulazna brzina vetra stalna, koeficijent snage bio bi predstavljen krivom linijom), slika 11.

Iako se profil ulazne brzine značajno razlikovao u slučajevima 1-3, generalno, odzivi vetroturbine su bili slični. Iz tog razloga, da bi se proverilo da li numerička vetroturbina pravilno reaguje, smanjen je period promene nominalne brzine (period promene stepenasto-sinusne funkcije). Može se primetiti da je tada vetroturbina značajno brže postigla zadatu vrednost nominalne ugaone brzine (slike 7 i 13).

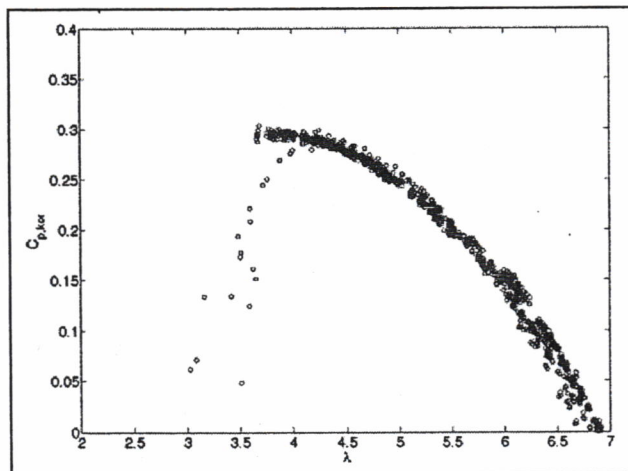
Konačno, razmatran je i slučaj veće promenljivosti ulazne brzine koji verovatno najviše odgovara realnim radnim uslovima, a čini se da dobijeni rezultati to i potvrđuju. Promena izlazne ugaone brzine rotora u vremenu je glatka, a i skup vrednosti koeficijenta snage je (dovoljno, ali ne i previše) raspršen.

5. ZAKLJUČCI

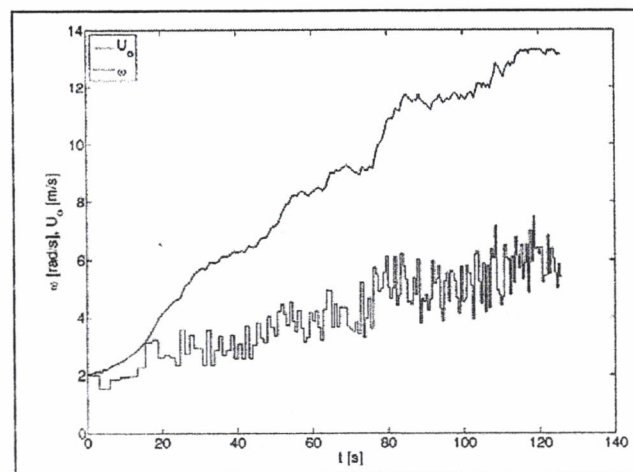
Ovim radom predstavljena je metodologija numeričkog ispitivanja performansi vetroturbine sa vertikalnom osom obrtanja pri promenljivoj brzini vetra. Uobičajeni način razmatranja unapređen je da bi bilo moguće uključiti i dinamičke efekte strujanja. Takav pristup omogućava brži i značajno ekonomičniji uvid u odziv i mogućnosti razmatranog dizajna vetroturbine pri radnim uslovima koji veoma liče na realne. Rezultate dobijene ovakvom numeričkom analizom moguće je koristiti na nekoliko različitih načina.



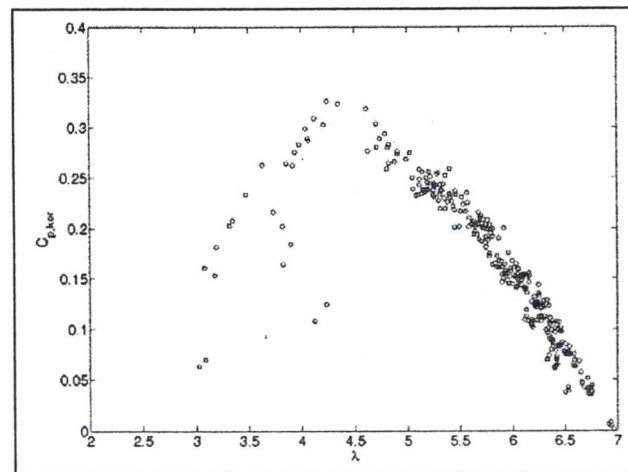
Slika 7. - Brzina vetra i ugaona brzina rotora



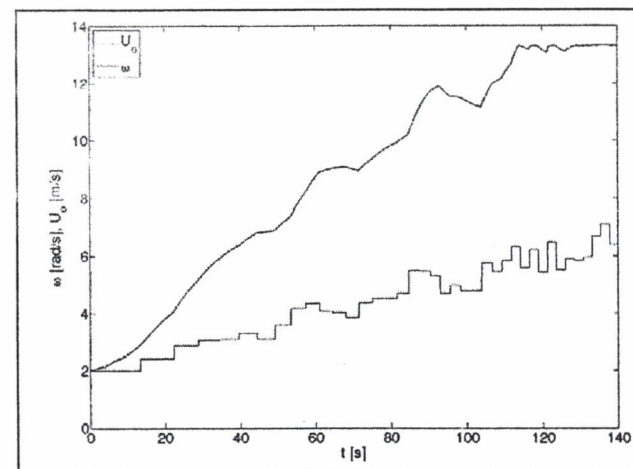
Slika 8. - Koefficient snage



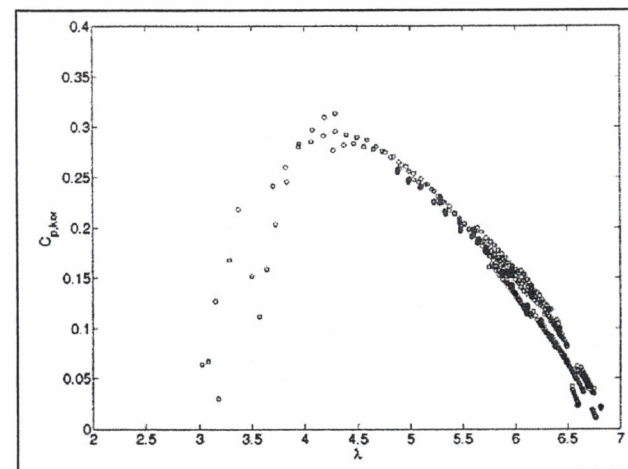
Slika 9. - Brzina vetra i ugaona brzina rotora



Slika 10. - Koefficient snage



Slika 11. - Brzina vetra i ugaona brzina rotora

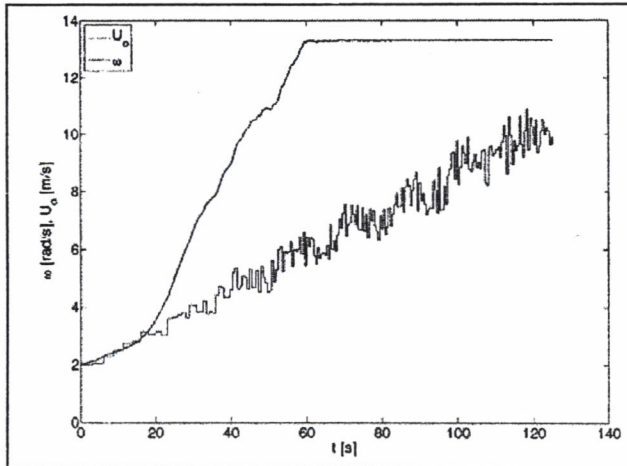


Slika 12. - Koefficient snage

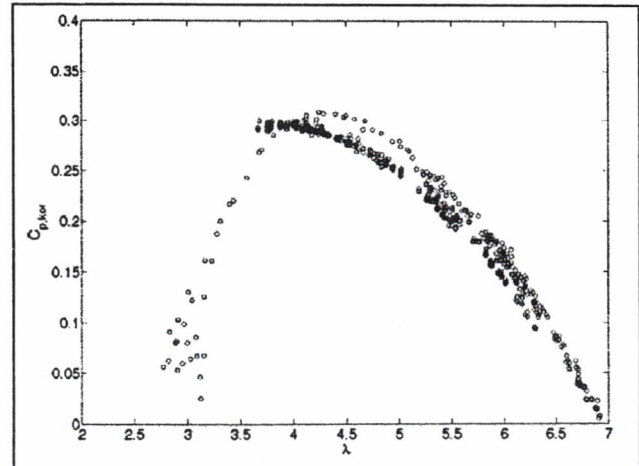
U prvom koraku, moguće je ostvariti bolji uvid u aerodinamičke performanse modela vetroturbine, odnosno početni matematički model je korigovan. Zatim, određeni podaci predstavljaju odličnu osnovu za planiranje i pripremu eksperimenta, npr. vrednost ugaone brzine rotora pri određenoj vrednosti ulazne brzine vetra ili brzinu odziva vetroturbine. Takođe, olakšan je i razvoj drugih elemenata kao što je gen-

erator električne energije, a koji predstavlja jedan od najproblematičnijih delova ovakvog sistema, kao i razvoj algoritma upravljanja vetroturbinom.

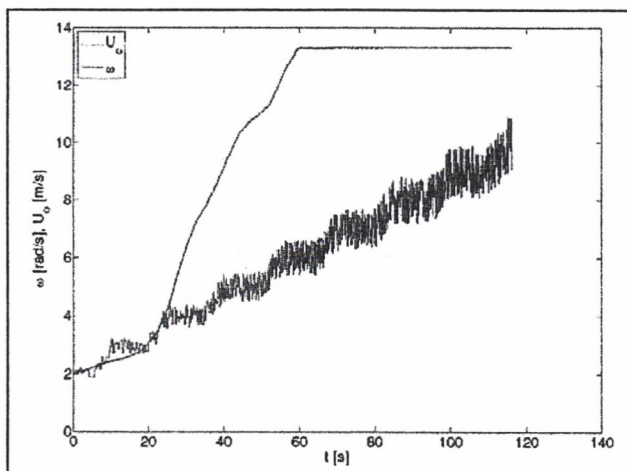
Predstavljenom analizom razmatrani su samo neki od osnovnih parametara promenljivosti strujnog polja. Da bi ovakav vid ispitivanja bio prihvaćen potrebne su dodatne analize osetljivosti ulaznih parametara



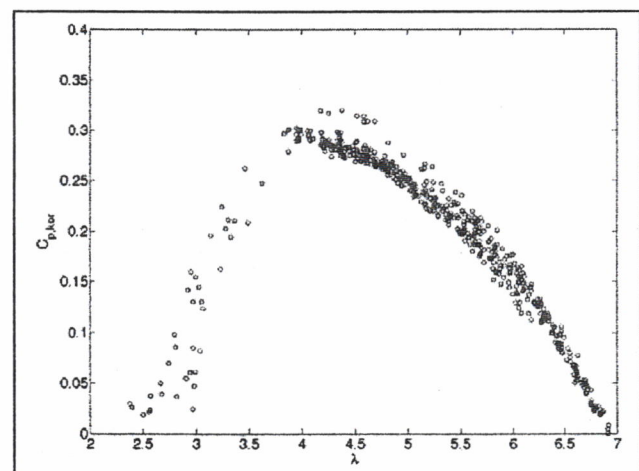
Slika 13. - Brzina vetra i ugaona brzina rotora



Slika 14. - Koeficijent snage



Slika 15. - Brzina vetra i ugaona brzina rotora



Slika 16. - Koeficijent snage

kao i dodatne validacije numeričke postavke, koja je u ovom stadijumu, vrlo jednostavna (razmatranja su ravanska). Sa druge strane, kako su terenska ispitivanja mnogo skuplja i trajnija (svaka tačka na slici 6 znači 10min rada), autori smatraju da predložena metodologija ima veliki potencijal. Svako unapređenje proračunskog modela (prostorna razmatranja, usitnjenje mreže ili korišćenje drugih, kompleksnijih turbulentnih modela) rezultovaće povećanjem validnosti numeričkih rezultata.

NAPOMENA

Prikazani rezultati ostvareni su u okviru istraživanja TR 35035 koje je finansirano od strane Ministarstva za prosvetu, nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije.

LITERATURA

- Islam M, Ting DS-K, Fartaj A. Aerodynamic models for Darrieus-type straight-bladed vertical axis wind turbines. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 12 (2008), 1087-109.
- Deglaire P, Eriksson S, Kjellin J, Bernhoff H. Experimental results from a 12kW vertical axis wind turbine with a direct driven PM synchronous generator. *European Wind Energy Conference EWEC 2007*, 07.05-10.05.2007, Milano.
- Bulow F. A Generator Perspective on Vertical Axis Wind Turbines. Doktorska disertacija, Univerzitet u Upsali, Švedska, 2013, ISSN 1651-6241.
- Danao LA, Eboibi O, Howell R. An experimental investigation into the influence of unsteady wind on the performance of a vertical axis wind turbine. *Applied Energy* 107 (2013), 403-411.
- Danao LA. The Influence of Unsteady Wind on the Performance and Aerodynamics of Vertical Axis Wind Turbines. Doktorska disertacija, Univerzitet u Šefildu, Engleska, 2012.
- Scheurich F, Brown RE. Modelling the aerodynamics of vertical-axis wind turbines in unsteady wind conditions. *Wind Energy* 16 (2013), 91-107.
- Koolman SJ, Tullis SW. Response of a Vertical Axis Wind Turbine to Time Varying Wind Conditions found within the Urban Environment. *Wind Engineering* 34 (2010), 389-401.