

## IZRADA MODELA ROTORA VERTIKALNIH VJETROTURBINA U CILJU ISPITIVANJA U ZRAČNOM TUNELU

### VERTICAL AXIS WINDTURBINE ROTOR MODEL MAKING FOR THE PURPOSE OF TESTING IN A WIND TUNNEL

**Ernad Bešliagić, dipl.inž.maš.**  
**Mašinski fakultet Univerziteta u Zenici**  
**Zenica**

**Kenan Varda, dipl.inž.maš.**  
**Mašinski fakultet Univerziteta u Zenici**  
**Zenica**

#### **REZIME**

*Ispitivanja u zračnom tunelu često se koriste za evaluaciju izlaznih performansi malih vertikalnih vjetroturbina. Iako se radi o malim vjetroturbinama, veličina njihovih rotora često prevazilazi veličinu testnih sekcija zračnih tunela. U takvim slučajevima ispitivanja se ne vrše na prototipovima nego na umanjenim modelima.*

*Jedan od načina proizvodnje modela lopatica vertikalne vjetroturbine jeste aditivna tehnologija koja omogućava izradu lopatica upotrebom 3D printera. U radu je opisan postupak proizvodnje svih dijelova rotora vjetroturbine kao i postupak statičkog balansiranja izrađenog rotora u cilju kompenziranja nesimetrične raspodjele masa u odnosu na osu obrtanja rotora.*

**Ključne riječi:** Vertikalna vjetroturbina, prototip, zračni tunel, statičko balansiranje

#### **SUMMARY**

*Wind tunnel experiments are often used to evaluate the output performances of small vertical wind turbines. Although these wind turbines are small, the size of their rotors often exceeds the size of the wind tunnel test sections. In such cases, the experiments are not performed on prototypes but on scaled models.*

*One of the ways for the model of a vertical wind turbine blades production is an additive technology that enables the production of blades using a 3D printer. This paper describes the production process of all parts of the wind turbine rotor as well as the process of static balancing of the produced rotor for the purpose to compensate the asymmetric mass distribution in relation to the rotor axis.*

**Keywords:** Vertical axis wind turbine, prototype, wind tunnel, static balancing

#### **1. UVOD**

Konačnu evaluaciju vjetroturbine, koja obuhvata određivanje njenih izlaznih performansi, moguće je izvršiti na dva načina. Prvi je da se vjetroturbina montira na željenu lokaciju na terenu i da se direktno mjere njene performanse. Drugi način jeste mjerenje njenih izlaznih karakteristika u zračnom tunelu. Prednost određivanja performansi vjetroturbine u zračnom

tunelu u odnosu na mjerenje na terenu jeste što se precizno kontrolisana mjerenja mogu izvršiti za znatno kraće vrijeme uz manje troškove.

Nedostatak ispitivanja vertikalnih vjetroturbina u zračnom tunelu je taj što one često, zbog svoje veličine, ne mogu fizički stati u zračni tunel, te se eksperimenti u zračnom tunelu umjesto na prototipovima izvode na umanjenim modelima. Pri tome treba praviti razliku između modela kao umanjene (nekada i uvećane) fizičke kopije nekog objekta i fizikalnog modela kao procesa kojim se eksperimentalno, u vremenu i prostoru, proučava neka pojava, a dobiveni rezultati se mogu prenijeti na svaki sličan proces.

Pored toga zidovi testne sekcije zračnog tunela dovode do toga da uslovi strujanja u tunelu nisu identični onima koji su prisutni kod neometanog strujanja te je zbog toga potrebno izvršiti određene korekcije izmjerenih izlaznih karakteristika. Jedna od korekcija jeste i korekcija uslijed pojave efekta blokade koji se javlja prilikom ispitivanja vertikalnih vjetroturbina u zračnim tunelima.

Da bi se odredio koeficijent korekcije efekta blokade pri ispitivanju u zračnom tunelu potrebno je izvršiti određivanje izlaznih performansi rotora vjetroturbine za različite vrijednosti odnosa površine koju zauzima rotor vjetroturbine i površine poprečnog presjeka testne sekcije zračnog tunela. Različite vrijednosti odnosa površina se mogu postići ili ispitivanjem istog modela vjetroturbine u zračnim tunelima različitih veličina ili ispitivanjem modela vjetroturbina različite veličine u istom zračnom tunelu. U okviru jednog istraživanja koje je prevedeno na Mašinskom fakultetu u Zenici primijenjen je ovaj drugi princip i bilo je potrebno napraviti deset različitih rotora Darrieusovih vjetroturbina sa ravnim i helikoidnim lopaticama.

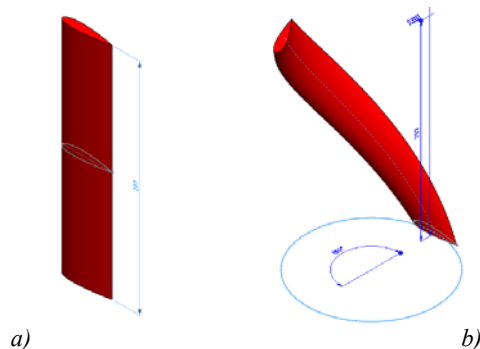
## **2. PROCES IZRADA MODELA ROTORA VERTIKALNE VJETROTURBINE**

Model rotora vjetroturbine se sastoji od lopatica, centralnih nosećih diskova, nosača lopatica i vratila. Na početku procesa izrade modela rotora kreirani su CAD modeli svih dijelova rotora. CAD modeli lopatica su iskorišteni prilikom izrade lopatica tehnologijom 3D printanja. Centralni noseći diskovi su izrađeni od pune plastike tehnologijom odstranjivanja materijala na strugu i stubnoj bušilici uz naknadno urezivanje potrebnih navoja. Koristeći iste tehnologije napravljeni su i nosači lopatica od valjanog čelika promjera  $\varnothing 8$  i  $\varnothing 10$  mm. Vratilo je napravljeno od čelične precizne bešavne cijevi  $\varnothing 16 \times 2$  mm dužine 700 mm. Povezivanje rotora sa vratilom je postignuto tako što tri nosača lopatica, prolazeći kroz centralni disk, vrše pritisak na vratilo i na taj način sprječavaju pomjeranje diska u odnosu na vratilo.

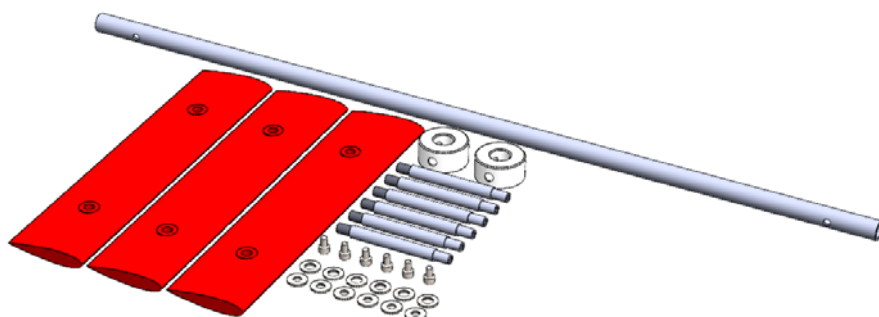
### **2.1. Izrada CAD modela rotora vertikalnih vjetroturbina**

3D CAD modeli rotora su napravljeni u softveru SolidWorks. Kreirani su pojedinačni modeli svih dijelova rotora. Nakon toga napravljeni su i sklopni modeli u koje su, pored kreiranih modela ubačeni i modeli potrebnih podloški i vijaka. Podloške i vijci se nisu morali modelirati pošto se radi o standardnim dijelovima koji se nalaze u biblioteci standardnih elemenata koja dolazi uz SolidWorks.

Lopaticice rotora vjetroturbina su modelirane izvlačenjem profila po putanji koja je kod ravnih lopatica pravolinijska i okomita na ravan u kojoj se nalazi skica profila dok se kod helikoidnih lopatica izvlačenje profila odvijalo po putanji koja ima oblik zavojnice (slika 1). Ugao zavojnice je  $120^\circ$  i predstavlja trećinu jednog punog koraka zavojnice. Koordinate tačaka na gornjoj i donjoj ivici četverocifrenih NACA profila su definisane poznatim izrazima i za tu namjenu je napravljen program u softveru MS Excel koji omogućava izračunavanje koordinata tačaka profila za različite dužine tetive profila. Izračunate koordinate su upotrijebljene za crtanje dvije krive linije koje predstavljaju gornju i donju ivicu profila i zajedno čine zatvorenu konturu aeroprofila. Nakon kreiranja tijela lopaticice na njemu su napravljeni otvori sa ojačanjima kroz koje prolaze nosači lopaticice.



Slika 1. Putanje izvlačenja profila prilikom modeliranja a) ravne i b) helikoidne lopatice



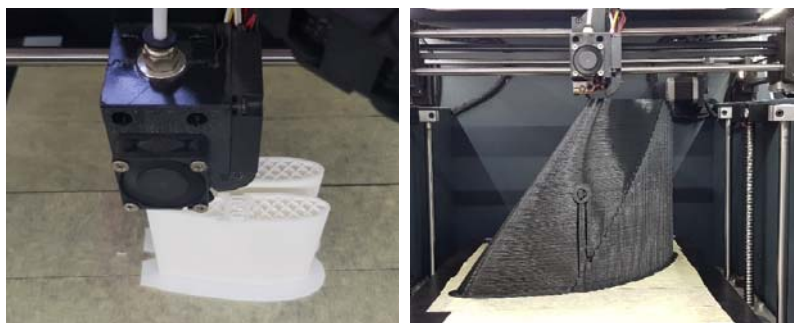
Slika 2. 3D CAD modeli svih komponenti jednog rotora sa ravnim lopaticama

## 2.2. Izrada lopatica vertikalnih vjetroturbin tehnologijom 3D printanja

Nakon kreiranja 3D modela pristupilo se izradi lopatica. U tu svrhu korištena je aditivna tehnologija proizvodnje, odnosno 3D printanje koje omogućava izradu predmeta direktno iz njegovog digitalnog zapisa. Korištena je FDM (*Fused Deposition Modeling*) tehnologija. 3D printeri koji rade na principu FDM tehnologije grade modele sloj po sloj od osnove do vrha zagrijavanjem i istiskivanjem termoplastičnog vlakna.

Termoplastično vlakno, odnosno filament koji je korišten za izradu lopatica vjetroturbin je PLA filament. Iako njena mehanička svojstva nisu na nivou svojstva koja imaju neke druge termoplastike (npr. ABS), PLA filament je često korišten materijal za 3D printanje.

Za izradu lopatica korišteni su 3D printeri koji su u tom trenutku bili dostupni na Mašinskom fakultetu u Zenici (slika 3). Za izradu svih lopatica je potrošeno 10 kg PLA filameta. Printanje ukupno 30 lopatica trajalo je 45 dana.



Slika 3. Postupak 3D printanja lopatica

Zbog ograničene veličine radnog prostora samo su se lopatice za najmanji par rotora mogle printati u jednom komadu. Sve ostale lopatice su se morale printati iz dva dijela i onda nakon toga spajati lijepljenjem. U tu svrhu bilo je potrebno prilagoditi 3D CAD modele lopatica. Za spajanje lopatice u jednu cjelinu korišteno je dvokomponentno epoksidno ljepilo.

Testovi koji su provedeni ranije su pokazali da su lopatice napravljene na ovaj način podložne pucanju pri većim brzinama vrtnje. Razlozi za to mogu biti sama tehnologija printanja sloj po sloj kao i nešto slabija mehanička svojstva korištenog filameta. Zbog toga je na svaku lopaticu, nakon spajanja u jednu cjelinu, nanesen sloj dvokomponentne poliesterske smole.

### **3. BALANSIRANJE MODELA ROTORA VERTIKALNE VJETROTURBINE**

Debalans je rezultat neravnomjerne raspodjele mase oko ose rotacije. Pojavljuje se kada centar mase rotora nije poravnat sa osom rotacije i/ili kada se osa rotacije ne poklapa sa glavnom osom inercije, što rezultira pojavom centrifugalne sile koja djeluje na rotor. Od brojnih uzročnika koji mogu izazvati pojavu debalansa [1], u slučaju rotora vjetroturbina treba izdvojiti slijedeće: nesimetrična raspodjela masa u odnosu na osu obrtanja, nehomogenost mase materijala rotora, ugradnja elemenata za učvršćivanje kao i neuravnoteženost aerodinamičkih sila koje djeluju na pojedine lopatice. Zato već u fazi izrade rotora vjetroturbine treba obratiti pažnju na uniformnost oblika i mase svih komponenti rotora.

Kada centar mase rotora ne leži na osi rotacije tada se javlja statički debalans i sve neuravnotežene mase rotora se mogu zamijeniti jednom masom. Uticaj te jedne mase može se eliminisati dodavanjem ili oduzimanjem mase na tačno određenom mjestu na rotoru. Da bi se uklonio statički debalans potrebno je izvršiti statičko balansiranje koje se izvodi u fazi mirovanja rotora.

Ako se osa rotacije ne poklapa sa glavnom osom inercije onda se javlja tzv. momentni debalans. U praksi se veoma često javlja i slučaj kada se centar mase ne poklapa sa osom rotacije a ni osa rotacije se ne poklapa sa osom inercije. Tada se javlja tzv. dinamički debalans. Da bi se eliminisali uticaji momentnog i dinamičkog debalansa potrebno je izvršiti dinamičko balansiranje prilikom kojeg se rotor mora vrtjeti. Postupkom dinamičkog balansiranja mogu se izbalansirati i rotori koji imaju statički disbalans dok obrnuto ne važi.

Statički balansi ne rotiraju tijelo kako bi se izmjerio debalans. Njihov rad se temelji na gravitaciji koja djeluje na tijelo u centru gravitacije. Iako može biti dugotrajna, ova metoda je jako učinkovita u procesu postizanja statičke ravnoteže. Gravitaciona sila, koja djeluje vertikalno naniže, pokretat će rotor sve dok se dodavanjem i oduzimanjem mase na identifikovanim dijelovima rotora ne uravnoteži masa. U ovu svrhu se koriste statički stolovi za balansiranje koji posjeduju vodilice prizmatičnog oblika po kojem se rotira vratilo rotora i na taj način se određuju lokacije masa koje uzrokuju debalans.

#### **3.1. Izrada stola za balansiranje rotora**

Da bi se moglo izvršiti statičko balansiranje rotora napravljen je sto za balansiranje. Širina stola za balansiranje je definisana visinom najvećeg modela rotora koji će se ispitivati. Dužina stola za balansiranje treba da bude tolika da obezbijedi najmanje tri obrtaja rotora. Kako je vratilo rotora promjera 16 mm minimalna dužina stola je 150 mm. Tako kratak sto ne bi bio praktičan pa je usvojena dužina koja je mnogo veća od minimalne. Da bi se istovremeno mogla balansirati dva rotora usvojena je dužina stola 2.000 mm. Visina stola određena je tako da rad osobe koja vrši balansiranje bude ugodan.

Sto za balansiranje se sastoji od tri cjeline. Prvu čini čelična konstrukcija prilikom čije izrade je posebna pažnja posvećena postizanju paralelnosti i upravnosti određenih dijelova konstrukcije. Drugi dio čine vodilice po kojima se kreće vratilo rotora vjetroturbine. Vodilice su napravljene od preciznog svjetlo vučenog kvadratnog čeličnog profila dužine stranice 20 mm. Vodilice su zavarene za noseću konstrukciju pod uglom od 45° tako da se jednom svojom

ivicom oslanjaju na gornju stranu čelične konstrukcije stola. Na taj način je postignuto da se kontakt između vodilica i vratila teoretski ostvaruje u samo dvije tačke što uticaj vodilica na debalans rotora svodi na minimum. Treću cjelinu stola za balansiranje čini šest plastičnih nogica za nivelisanje stola. Pomoću njih se, prije početka postupka balansiranja, vrši precizno podešavanje horizontalnog položaja vodilica.

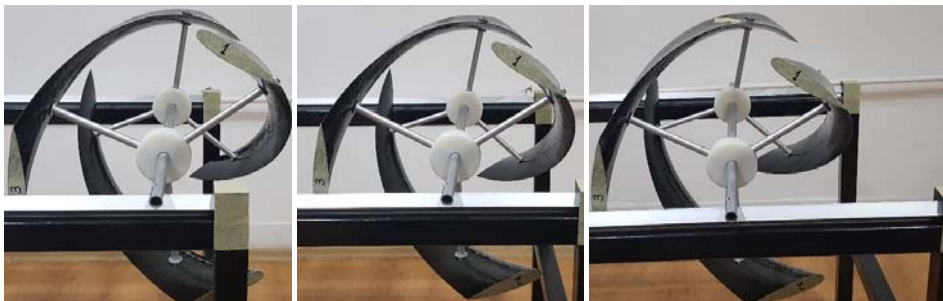


*Slika 4. 3D CAD model stola za balansiranje*

### **3.2. Statičko balansiranje modela rotora vjetroturbina**

Prije početka balansiranja rotora izvršeno je nivelisanje stola za balansiranje u cilju da vodeće ivice vodilica leže u ravnini koja je u najvećoj mogućoj mjeri horizontalna. Zbog toga je izvršeno precizno pozicioniranje vodilica u dva pravca. Balansiranje je izvedeno pomoću dvije libele (vaser vage) tačnosti 0,5 mm/m i 0,02 mm/m. Prvo je provedeno približno nivelisanje stola za balansiranje libelom manje tačnosti a nakon toga libelom veće tačnosti. Proces nivelisanja stola je iterativan i zahtijeva dosta pažnje i strpljivosti. Dobro nivelisan sto garantuje postizanje dobrih rezultata prilikom balansiranja rotora.

Postupak balansiranja rotora počinje postavljanjem rotora na vodilice stola. Nakon toga laganim guranjem se inicira njegovo obrtanje i kretanje po vodilicama. Taj postupak se ponavlja najmanje tri puta. Ako se rotor svaki put zaustavi u istom položaju to je znak da u tom položaju rotoru treba oduzeti masu u donjem dijelu ili dodati masu u gornjem dijelu rotora. U našem slučaju opcija oduzimanja mase sa lopatica vjetroturbina ne dolazi u obzir jer bi se na taj način narušila konstrukciona stabilnost lopatice koja je svakako na samoj granici izdržljivosti (zbog načina izrade lopatice i velikih brzina obrtanja). Sa druge strane, dodavanje mase na lopatice nije jednostavno pošto se ne smiju narušiti aerodinamičke karakteristike lopatice. Vrijednost mase koja se treba dodati na gornjoj strani nije poznata i određuje se postepeno. Postupak određivanja mase potrebne za balansiranje je iterativan i zahtijeva ponavljanje istih koraka više puta.



*Slika 5. Tri ista položaja u kojem se zaustavio rotor vjetroturbine*

Na slici 5. prikazana su tri ista položaja u kojem se zaustavio rotor vjetroturbine. Nakon toga je na rotor, na gornjoj lopatici, dodana masa u cilju postizanja balansa. To je urađeno na taj način da što se podloška poznate mase ljepljivom trakom lijepila za lopaticu. Nakon dodavanja mase ponavljan je postupak sve dok se rotor nije, bez oscilovanja, zaustavio u različitim položajima prilikom svakog pokretanja. Na slici 6. prikazana su tri različita položaja u kojima se zaustavio rotor nakon dodavanja masa.



*Slika 6. Tri različita položaja u kojima se zaustavio rotor nakon dodavanja masa*

Nakon što su određeni položaji i mase koje potrebno dodati na lopatice rotora bilo je potrebno masu zalijepljenih podloški zamijeniti na način koji neće mnogo uticati na aerodinamička svojstva lopatice. To je riješeno na taj način što su lopatice, u zonama gdje je trebalo dodati masu, dodatno premazivane poliesterskom smolom. Zona koja je premazivana je naravno bila šira od mjesta gdje su se nalazile podloške. I postupak dodavanja novih slojeva smole je (zbog kratkog vremena stvrdnjavanja a dužeg vremena sušenja smole) bio iterativan i relativno dugotrajan. Ukupno vrijeme trajanja balansiranja pojedinih rotora je varirao, od nekoliko sati do nekoliko dana, u zavisnosti od veličine rotora i ukupne mase koje je trebalo dodati na rotor. Prilikom balansiranja rotora sa ravnim lopaticama postupak određivanja mase koju je potrebno dodati je bio nešto teži pošto se rotor najčešće zaustavljao u takvom položaju da sa gornje strane fizički nije postojala lopatica na koju bi se dodala masa. Zbog toga je prvo bilo potrebno, dodavanjem mase na neku od lopatica, dovesti rotor u takav položaj da se jedna lopatica nalazi u gornjem položaju. Nakon toga se mogao sprovesti postupak balansiranja rotora na isti način kao što je to rađeno kod rotora sa helikoidnim lopaticama.

#### **4. ZAKLJUČAK**

Da bi se moglo izvršiti ispitivanje vertikalnih vjetroturbina u zračnom tunelu potrebno je napraviti umanjene modele rotora. Zbog njihovog složenog oblika tehnologija 3D printanja se nametnula kao jedno od najboljih rješenja za brzu izradu lopatica rotora vjetroturbina. Ipak, nešto slabija mehanička svojstva ovako izrađenih lopatica zahtijevaju da se posebna pažnja posveti kvalitetu izrade svih elemenata rotora kao i balansiranju rotora.

U radu je opisan postupak statičkog balansiranja izrađenih rotora. U skladu sa prikazanom procedurom izvršeno je određivanje potrebnih masa koje je bilo potrebno dodati na lopatice rotora. Potrebna masa je dodavana premazivanjem određenih zona lopatica dvokomponentnom poliesterskom smolom. Naknadno provedena ispitivanja na ovaj način izrađenih rotora su potvrdila uspješnost ovog načina izrade jer ni jedna lopatica rotora nije pukla prilikom tih ispitivanja.

#### **5. REFERENCE**

- [1] Ličen, H., Zuber, N., Balancing Wizard-univerzalno rešenje za balansiranje krutog rotora. Tehnička dijagnostika, 2003. 2(3): p. 5-11.