



Posteljnik Z., Stupar S., Svorcan J., Petrašinović N.<sup>1)</sup>

## POREĐENJE EKSPERIMENTALNIH I NUMERIČKIH ANALIZA DEFORMACIJA KOMPOZITNE LOPATICE VETROTURBINE<sup>2)</sup>

### Rezime

Lopaticе ветротурбине су последњих година предмет великог броја истраживања. Због своје одговорне улоге и бројних захтева које морају испунити пројектовање и производња лопатика јесу сложени процеси који подразумевају значајан утрошак времена. Применом одговарајућих програмских пакета у току пројектовања могуће је извршити preliminarnu procenu performansi лопатике које би накнадно биле верификоване експериментом. Такође, погодности нумеричких симулација могуће је искористити и за процену унутрашње структуре композитних лопатика, с обзиром да већином овакви подаци нису доступни од стране произвођача. Тако је у приказаном раду анализирана структура композитне лопатике ветротурбине, а за задата оптерећења упоређени су резултати деформација добијених статичким испитивањем и нумеричким прорачуном.

*Кључне речи:* лопатике ветротурбина, експеримент, МКЕ, композити

### 1. UVOD

Vetroturbine predstavljaju jedan od danas veoma zastupljenih vidova korišćenja obnovljivog izvora energije. Radi povećanja efikasnosti pretvaranja mehaničke energije u električnu i osiguranja dugog i pouzdanog radnog veka ovakvog sistema, posebnu pažnju je potrebno posvetiti razvoju i proizvodnji rotora vetroturbine. On se sastoji od glavčine rotora na koji su montirane, uglavnom kao optimalno rešenje, tri lopatice. Maksimalno iskorišćenje energije vetra najviše zavisi od konstrukcije lopatica, s toga one i jesu najkritičnije komponente vetroturbine. [1] U toku poslednje decenije dimenzije rotora znatno su povećane, pa je samim tim i cela konstrukcija opterećenija. Ovo svakako predstavlja izazov sa aspekta strukture lopatice, počevši od izbora materijala koji značajno utiče na performanse lopatice, kao i njene karakteristike – masu, mehanizam oštećenja, radni vek do pojave zamora, itd. Zbog svojih višestrukih prednosti u odnosu na metale (poboljšanog odnosa mase i nosivosti, mogućnosti da se lakše oblikuju prema kompleksnoj geometriji) primena kompozitnih materijala u izradi lopatica vetroturbina je veoma rasprostranjena. [2] Osobina kompozita je da su anizotropni materijali i to se koristi za poboljšanje performansi komponenata. Najčešće su u upotrebi u formi preimpregniranog platna - staklena, ugljenična ili aramidna vlakna u kombinaciji sa epoksi ili poliestarskom smolom. Postupkom lamiranja (slaganja) ovih platana dobija se laminat – laminarni kompozit koji se i koristi kod strukturalno najodgovornijih elemenata, kao što su lopatice vetroturbina. Veliki broj faktora mora biti uzet u obzir prilikom projektovanja kompozita; karakteristike novonastalog kompozita ne zavise samo od materijala ispune (vlakana) i matrice (smola, metal, keramika), već i od toga u kom su odnosu međusobno zastupljeni, kakav je geometrijski oblik i raspored vlakana u matrici. Takođe, važno je uzeti u obzir pretpostavljena spoljna opterećenja, uslove u kojima će materijal biti korišćen, itd. Pouzdanost projektovane kompozitne lopatice mora biti ispitana na određen način i garantovana, kako bi ona uspešno ispunila svoj radni vek. Dakle, propisnim testiranjem prototipa kompozitne lopatice treba utvrditi da li je izabrani materijal u stanju da izdrži sva opterećenja kojima je lopatica izložena u operativnim uslovima. Izvođenje eksperimentalnih ispitivanja lopatica u punoj razmeri najčešće je izuzetno skupo, pa se nумеричке

<sup>1)</sup> Zorana Posteljnik, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, ([zposteljnik@mas.bg.ac.rs](mailto:zposteljnik@mas.bg.ac.rs)), prof. dr Slobodan Stupar, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, ([ssupar@mas.bg.ac.rs](mailto:ssupar@mas.bg.ac.rs)), ass. dr Jelena Svorcan, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, ([jsvorcan@mas.bg.ac.rs](mailto:jsvorcan@mas.bg.ac.rs)), Nikola Petrašinović, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, ([npetrasinovic@mas.bg.ac.rs](mailto:npetrasinovic@mas.bg.ac.rs))

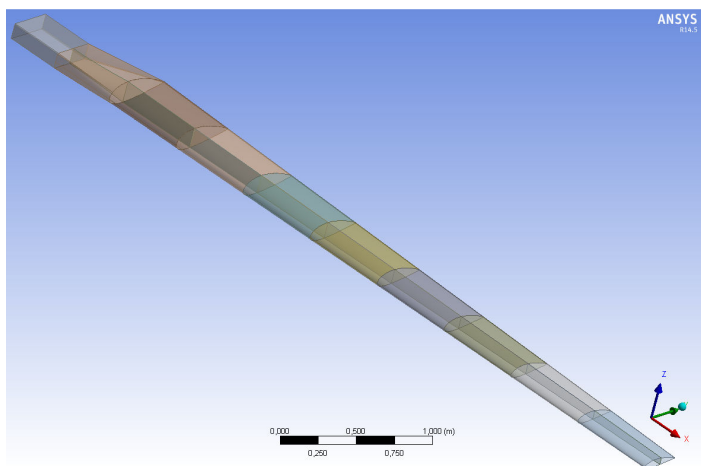
<sup>2)</sup> U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja koja se sprovode na projektu TR\_35035: Istraživanje i razvoj savremenih pristupa projektovanju kompozitnih lopatica rotora visokih performansi, koji finansijski podržava Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

simulacije u odgovarajućim programskim paketima nameću kao odličan vid uštede vremena i novca, s obzirom na mogućnost višekriterijumske optimizacije strukture modela lopatice. [3]

Prikazani rad predstavlja istraživanje u oblasti strukture lopatice vetroturbine male snage. Analizirana lopatica je uzeta u obzir sa vrlo malo početnih informacija; aerodinamički oblik je poznat i nije dalje razmatran, nominalno opterećenje za koje je izvršeno statičko ispitivanje takođe je dato. Tehnologija proizvodnje lopatice nije bila dostupna od strane proizvođača, pa su materijal i unutrašnja struktura lopatice pretpostavljeni tako da zadovoljavaju uslov težine. Prilikom izbora nepoznatih parametara uzeta su u obzir brojna istraživanja i stečena iskustva u okviru vodećih instituta i kompanija u svetu koja su bila dostupna. [3-5] Za numeričku analizu primenom metode konačnih elemenata korišćen je komercijalni softver ANSYS, i na osnovu ovog modela upoređeni su rezultati deformacija sa onim dobijenim eksperimentalnim putem i izvedeni su određeni zaključci.

## 2. NUMERIČKI MODEL I ANALIZA MKE

Geometrijski model je dužine 5894 mm, umesto 6000 mm kolika je dužina prave lopatice, jer vrh lopatice nije uzet u razmatranje. Maksimalna dužina tetive iznosi 526 mm, dok je pri vrhu lopatice 290 mm. U korenom delu lopatice korišćen je aeroprofil NACA 4430 iz strukturalnih razloga, a pri vrhu NACA 4420 radi održanja aerodinamičke efikasnosti. Lopatica nije vitoperena, pa se sa slike 1 može zaključiti da je polazni model nije kompleksne geometrije. Radi jednostavnosti lopatica je prvobitno modelirana u programskom paketu CATIAv5, a zatim uvezena u ANSYS.



*Slika 1. Geometrijski model lopatice*

Tabela 1. Mehaničke karakteristike materijala		
Materijal	Unidirekcioni E-staklo/epoksi	Pena
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	2100	200
$E_x$ (MPa)	60 000	80
$E_y$ (MPa)	13 000	80
$E_z$ (MPa)	13 000	20
$\nu_{xy}$	0.3	0.35
$\nu_{yz}$	0.4	0.35
$\nu_{xz}$	0.3	0.35
$G_{xy}$ (MPa)	4000	29
$G_{yz}$ (MPa)	4600	29
$G_{xz}$ (MPa)	4600	29

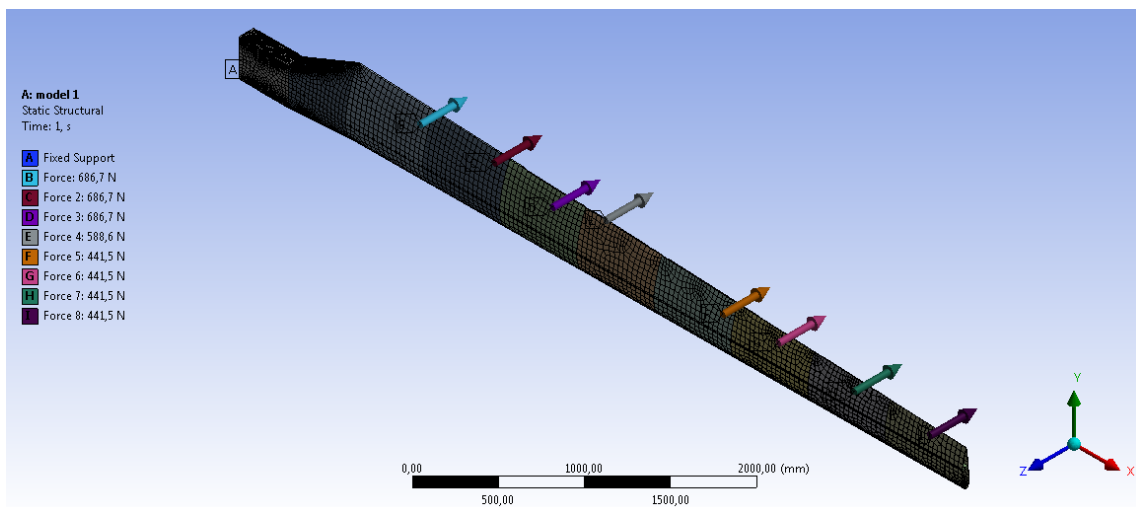
Usled nedostataka informacija o strukturi lopatice i materijalu od kojeg je napravljena (poznato je samo da je kompozit u pitanju), pretpostavljeno je da lopatica ima I-profilnu ramenjaču koja se prostire duž aeroprofilisanog dela i postavljena je na 30% tetive u korenu i 50% tetive pri vrhu lopatice. Iako je u definisanju strukture lopatice dominantan i kutijasti oblik ramenjače, I-profilna ramenjača zastupljenija je u kod lopatica manjih dimenzija i u slučajevima kada su korišćeni aeroprofil male relativne debljine, pa je iz tog razloga i izabrana za ovaj numerički model. Debljina zida ramenjače je veća u odnosu na debljinu oplata kako bi se obezbedila stabilnost lopatice. Radi uštede u masi ramenjača se uglavnom pravi od kompozita sendvič konstrukcije, za čije jezgro se biraju razni penasti materijali, balsa drvo, stiropor, itd, što je učinjeno i u ovom radu.

Kao najčešće korišćeni materijali u izradi lopatica javljaju se staklena i ugljenična vlakna u kombinaciji sa epoksi smolom. Za prikazani model izabrana su duga neprekidna E-staklena vlakna, prvenstveno zbog jednostavnosti procesa proizvodnje, niže cene, izrazito visoke čvrstoće, otpornosti na toplotu. Iako je ova vrsta vlakana slabijih fizičkih karakteristika od vlakana tipa S i R, vrlo često su u upotrebi jer se njihovom primenom mogu zadovoljiti određeni strukturni zahtevi koji se postavljaju pred ovakvu kompozitnu lopaticu. Vlakna su u aeroprofilisanom delu lopatice postavljena pod uglovima od 0°, koji se poklapa sa podužnom osom lopatice kao otpor savijanju; +45° i -45°, kao otpor uvijanju i izvijanju.

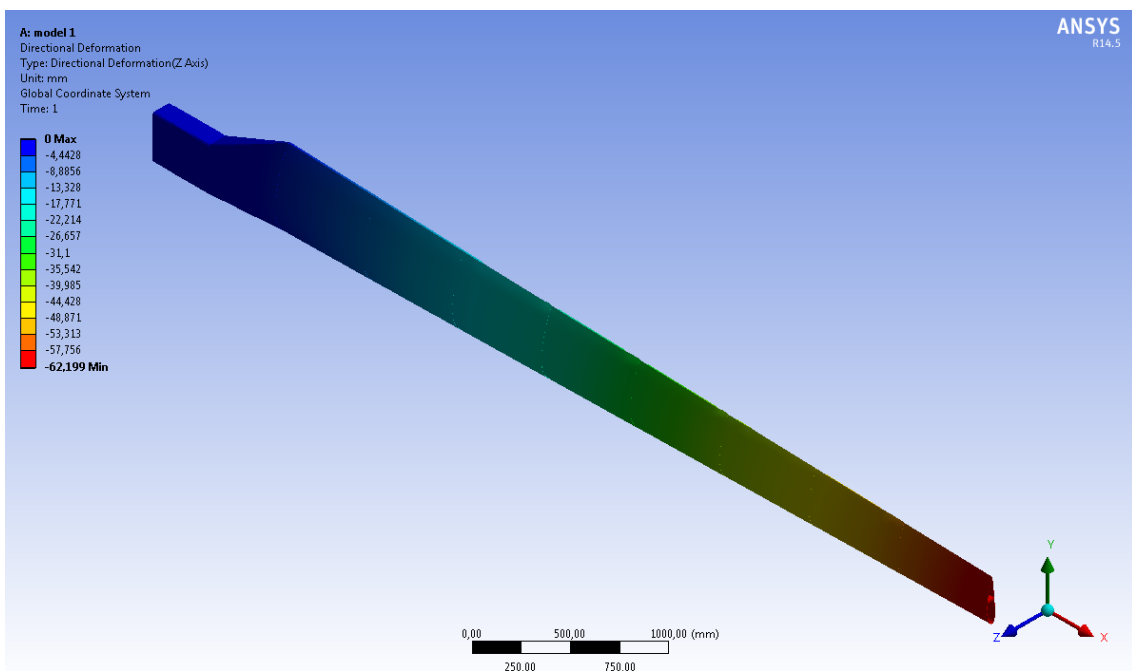
Raspodela debljine slojeva (oplate) formirana je tako da se zadovolji uslov težine lopatice koji iznosi 75 kg. Najveća debljina oplata je u korenom delu, i u prelazu na aeroprofilisani deo, jer se na tim mestima javlja najveća koncentracija napona. Jedan od načina određivanja raspodele debljine oplata u preliminarnom dizajnu strukture prikazan je u radu [6]. Geometrijski model podeljen je na pet delova i ramenjaču; formirana struktura lopatice prikazana je u tabeli 2. Svi formirani laminati su simetrični.

Tabela 2. Pretpostavljena struktura lopatice				
Segment	r (mm)	Šema ređanja lamina	Debljina laminata (mm)	Materijal
Koreni deo	0 – 901	[(0/90)6] <sub>s</sub>	10.4	UD E-staklo/epoksi
Aeroprofilisani deo 1	901 – 2149.25	[(0/45/0/-45/0)4] <sub>s</sub>	8.8	UD E-staklo/epoksi
Aeroprofilisani deo 2	2149.25 – 3397.5	[(0/45/0/-45/0)3] <sub>s</sub>	6.8	UD E-staklo/epoksi
Aeroprofilisani deo 3	3397.5 – 4645.75	[(0/45/0/-45/0)2] <sub>s</sub>	4.4	UD E-staklo/epoksi
Aeroprofilisani deo 4	4645.75 – 5894	[0/45/0/-45/0] <sub>s</sub>	2.1	UD E-staklo/epoksi
Ramenjača	901 – 5894	[-30/0/30/0/-30/0/30/pena] <sub>s</sub>	14	UD/Pena/UD

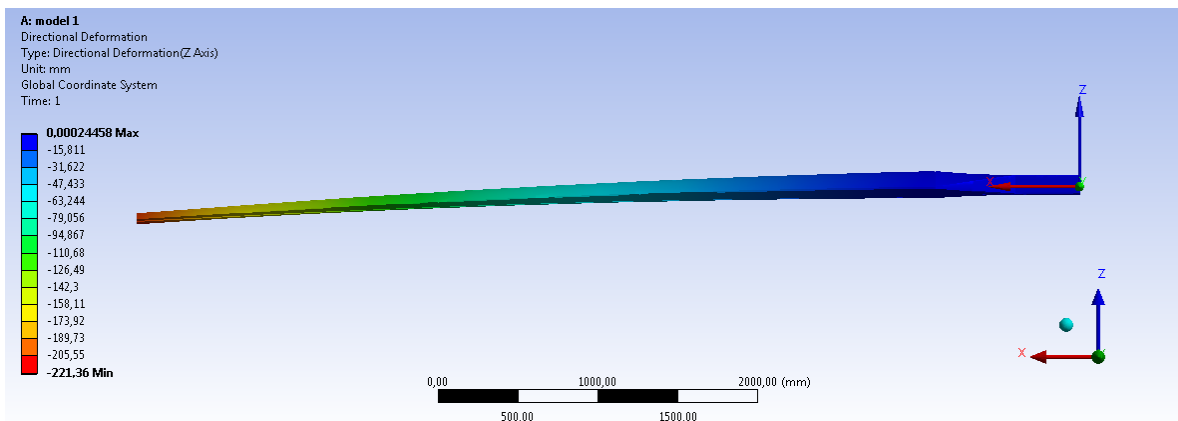
Numerički proračun izvršen je u programu ANSYS14.5, za 8 slučajeva opterećenja. Mreža se sastoji od 11554 elemenata i nije dodatno usložnjena iako bi to doprinelo tačnosti rezultata, ali i dužem proračunu; u ovom slučaju smatrano je da su dobijene vrednosti pomeranja zadovoljavajuće. Na slikama ispod prikazani su rezultati nekih od slučajeva opterećenja, a kompletne vrednosti i poređenje sa eksperimentalnim rezultatima dato je u poglavlju – Zaključak.



Slika 2. Formirana mreža i vrednosti opterećenja



Slika 3. Rezultati dobijeni unosom opterećenja 5



*Slika 4. Rezultati dobijeni unosom opterećenja*

### 3. STATIČKO TESTIRANJE LOPATICE

Statičko ispitivanje ima važnu ulogu u proceni performansi jedne lopatice i dosta se pažnje posvećuje ovom načinu testiranja. [7,8] Vrši sa ciljem utvrđivanja da li je lopatica dovoljno čvrsta da izdrži ekstremna opterećenja. Takođe bi trebalo da bude dovoljno kruta kako ne bi došlo do kontakta njenog vrha sa stubom vetroturbine u toku rada, pojave rezonance, itd.

Na slikama 5-11 može se videti kompozitna lopatica koja je testirana u ovom istraživanju. Prvenstveno je izvršen prihvat lopatice, odnosno uklještenje u korenom delu, a zatim je obeleženo 8 mernih mesta. Na stani gornjake, na 1/4 dužine tetive, postavljena su ulazna mesta za opterećenja. Duž donjake lopatice, na mestima koja odgovaraju mestima unosa opterećenja, postavljeni su davači pomeranja – uređaji za merenje pomeranja lopatice u pravcu dejstva opterećenja.



*Slika 5. Uklještenje lopatice*



*Slika 6. Postavka eksperimenta*

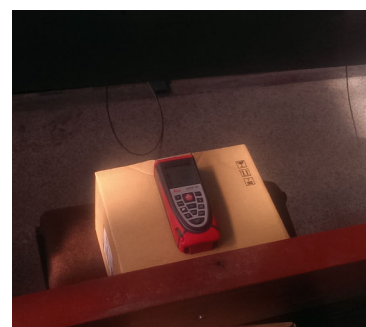
Merno mesto 1, u korenu lopatice, mereno je pomoću komparatera, slika 5, na sledećih 5 mernih mesta korišćeni su ekstenziometri dužina hoda od 150 do 270 mm, slike 7 i 8, dok su na poslednja dva merna mesta deformacije merene pomoću laserskih daljinomera, slika 9.



*Slika 7. Ekstenziometar*



*Slika 8. Ekstenziometar*

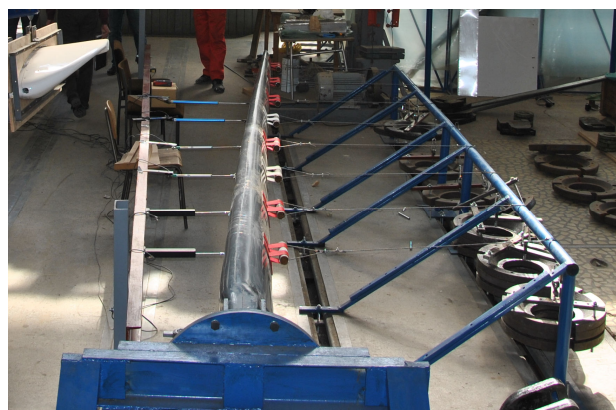


*Slika 9. Laserski daljinomer*





Slika 10. Lopatica u nultom položaju



Slika 11. Opterećenje lopatice tegovima

Lopatica je postepeno opterećivana tegovima potrebne težine kao što je prikazano u tabeli 3, (8 slučajeva opterećenja). Za svako zadato opterećenje merena su pomeranja u odnosu na nulti položaj kada je lopatica neopterećena pomoću merno-akvizicionog sistema na računaru. Rezultati su prikazani u tabeli 3.

**Tabela 3.** Opterećenje i deformacije lopatice po mernim mestima

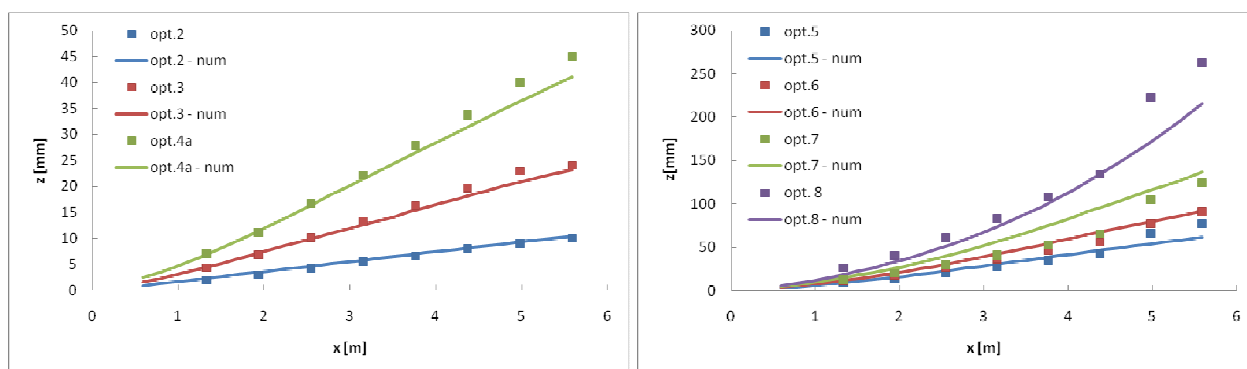
	MM1	MM2	MM3	MM4	MM5	MM6	MM7	MM8
Koor. [m]	1,3302	1,9388	2,5473	3,1557	3,7642	4,3727	4,9812	5,5897
Opterećenje 1[kg]	70							
Pomeranje [mm]	0,682	0,978	1,733	1,379	2,037	2,433	2	2
Opterećenje 2[kg]	70	70						
Pomeranje [mm]	1,917	2,978	5,492	4,257	6,589	8,025	9	10
Opterećenje 3[kg]	70	70	70					
Pomeranje [mm]	4,359	6,82	13,197	10,115	16,232	19,7	23	24
Opterećenje 4[kg]	70	70	70	60				
Pomeranje [mm]	7,099	11,118	22,202	16,679	27,895	33,78	40	45
Opterećenje 5[kg]	70	70	70	60	45			
Pomeranje [mm]	8,94	13,919	27,865	20,885	35,018	42,389	66	77
Opterećenje 6[kg]	70	70	70	60	45	45		
Pomeranje [mm]	11,602	18,043	36,222	27,053	46,219	55,957	77	91
Opterećenje 7[kg]	70	70	70	60	45	45	45	
Pomeranje [mm]	13,077	20,298	41,377	30,592	53,446	65,6	105	124
Opterećenje 8[kg]	70	70	70	60	45	45	45	45
Pomeranje [mm]	26,419	40,819	60,977	83,021	108,204	133,691	222,5	263

#### 4. ZAKLJUČAK

U radu su prikazani numerički model kompozitne lopatice i analiza metodom konačnih elemenata, kao i statičko testiranje iste u punoj razmeri za zadata opterećenja. Dobijene vrednosti deformacija date su u formi dijagrama – tačkama su predstavljene vrednosti rezultata eksperimenta (tabela 3.), dok linije prikazuju vrednosti pomeranja dobijene numeričkim proračunom koje se nalaze duž lopatice na 1/4 tetive – istoj lokaciji na kojoj su postavljeni i davači pomeranja prilikom izvođenja eksperimenta. Vidimo da se rezultati za manja opterećenja jako dobro poklapaju, dok za nešto veća opterećenja najveća greška iznosi 20%, što smatramo prihvatljivim u preliminarnim inženjerskim proračunima. S toga, nameće se zaključak da izabrana kompozitna struktura lopatice može da odgovara realnom modelu.

Naravno, treba naglasiti da je numerički model lopatice uprošćen, npr. spoj ramenjače sa oplatom koji nazivamo zid ramenjače takođe ima svoju ulogu u prenosu opterećenja, a smanjuje i koncentraciju napona koji se javlja na ovom spoju. Njegove dimenzije isto utiču na čvrstoću lopatice i, kao i mnogi drugi parametri

– položaj i debljina ramenjače, raspored debljine slojeva, najčešće i najbolje se određuju metodama optimizacije (genetski algoritam, optimizacija rojem čestica, itd.). U tom smislu, složeniji model lopatice bi sigurno doveo do još tačnijih rezultata.



**Slika 12.** Poređenje numeričkih i eksperimentalnih rezultata

Iako troškovi proizvodnje kompozitne lopatice iznose 15-20% od ukupne cene vetroturbine, inovacije u dizajnu strukture lopatice predstavljaju zanemarljiv iznos u odnosu na ukupan trošak zahvaljujući numeričkim proračunima i tehnikama optimizacije. Jedan od načina kojim bi se predložena struktura lopatice u ovom radu mogla tačnije odrediti jeste upotrebom neuronskih mreža.

## 5. LITERATURA

- [1] Burton T, Sharpe D, Jenkins N, *Wind Energy Handbook*, John Wiley & Sons Ltd, USA, 2004
- [2] Jones R., *Mechanics of Composite Materials*, Taylor and Francis, USA, 1999
- [3] Dal Monte A., Castelli M., Benini E., *Multi objective structural optimization of a HAWT composite blade*, Composite structures, 106 (2013), 362-373
- [4] Chen J, et al. *Structural optimization study of composite wind turbine blade*, Materials and Design 46 (2013) 247-255
- [5] Mandell, J. E., Samborsky, D. D., *DOEMSU composite material fatigue database: Test methods, materials, and analysis*. Contractor Report SAND97-3002, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM USA, 1997
- [6] Wu W.H, Young W.B, *Structural analysis and design of the composite wind turbine blade*, Applied Composite Materials (2012) 19:247-257
- [7] Malhotra P., Hyers R.W., Manwell J.F., McGowan J.G., *A review and design study of blade testing systems for utility-scale wind turbines*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16 (2012) 284-292
- [8] Jorgensen E. R., et al. *Full scale testing of wind turbine blade to failure - flapwise loading*, Risoe-R-1392, Risoe National Laboratory, Roskilde, 2004

Posteljnik Z., Stupar S., Svorcan J., Petrašinović N.

## COMPARISON OF EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF COMPOSITE WIND TURBINE BLADE DEFORMATION

**Abstract:** In recent years wind turbine blades are subject of numerous research and studies. Because of their responsible function in wind turbine system, and requirements that must be satisfied, design of the blades is complex process that involves significant amount of time. By using modern software tools during the design phase it is possible to conduct preliminary assessment of blade's performance which would be subsequently verified by experiment. Also, numerical simulations can be used for composite blade internal structure prediction. This paper presents structural analysis of composite wind turbine blade. Comparison of numerical results and results obtained by static testing is given.

**Key words:** wind turbine blades, composites, FEA, testing