

Zorana POSTELJNIK, Slobodan STUPAR, Aleksandar SIMONVIĆ,
Jelena SVORCAN, Nikola PETRAŠINOVIĆ
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd

UDC:621.311.24.001.573

Numerička analiza naponsko-deformacionog stanja kompozitne lopatice vetroturbine

REZIME

Na osnovu definisanog aerodinamičkog oblika, i podataka o težini i opterećenju lopatice vetroturbine male snage izvršeno je numeričko modeliranje i proračun strukture lopatice metodom konačnih elemenata. Kako unutrašnja struktura lopatice nije poznata, usvojeno je da je lopatica laminarne strukture ojačana I-profilnom ramenjačom, a za osnovni materijal izabran je staklo/epoksi. Konfiguracija kompozitne strukture – raspodela debljine slojeva i način slaganja slojeva predstavljaju promenljive veličine, pa je formirano nekoliko potencijalnih modela strukture za koje su izvršeni proračuni. Dobijeni rezultati služe za preliminarnu procenu performansi lopatice i biće korišćeni kao ulazni podaci za definisanje metodologije ispitivanja i projektovanje ispitnih instalacija.

Ključne reči: vetroturбина, strukturalna analiza, metoda konačnih elemenata, kompozitna lopatica, ispitivanje lopatica.

STRESS ANALYSIS OF COMPOSITE WIND TURBINE BLADE

ABSTRACT

Based on the aerodynamic shape, load and weight data of small-scale composite wind turbine blade, numerical modeling and structural analysis of the blade were performed by a finite element method (FEM). Internal structure data of the blade was unavailable, so it has been adopted that the blade has laminate structure with I-spar design. The composite material used in this study is glass fiber reinforced epoxy. Composite lay-up design of the blade determines lay-up angle, lay-up thickness and lay-up sequence. According to that, several different lay-up structures were designed and calculations were performed. Numerical analysis results are used for preliminary performance prediction of the blade and will also be used as input data for defining test methodology and installation.

Key words: wind turbine, structural analysis, FEM, composite wind turbine blade, blade testing.

1. UVOD

Vetar, kao jedan od obnovljivih izvora energije, ima sve većeg udela u ukupnoj proizvodnji električne energije u svetu poslednjih godina. To nije rezultat samo većeg broja instaliranih vetroturbin, već i povećanja dimenzija, odnosno prečnika rotora [1]. Konkurentnost na tržištu postavlja zahteve za proizvodnjom efikasnijih i isplativijih vetroturbin koje će biti dugog i pouzdanog radnog veka, što predstavlja izazov sa strukturalnog, ali i ekonomskog aspekta. Lopatice vetroturbin, kao veoma odgovorne komponente ovog sistema, moraju zadovoljiti određene

zahteve u pogledu strukture, koji podrazumevaju otpornost u ekstremnom slučaju opterećenja, deformaciju u određenom opsegu kako ne bi došlo do kontakta vrha lopatice sa stubom, izbegavanje pojave rezonance i kritičnih napona u materijalu, i radni vek od 20 godina [2]. Stoga se posebna pažnja mora posvetiti dizajnu i procesu proizvodnje lopatica, koji imaju veliki uticaj na njihove strukturalne performanse. Takođe, zamorni vek lopatice se mora uzeti u obzir prilikom definisanja strukture, pa je i odgovarajuće testove realnog modela potrebno sprovesti. Kako je to uglavnom veoma skupo, naročito u slučaju kompozitnih lopatica, predloženi modeli strukture se primenom

raznih metoda optimizacije, numeričkim proračunima verifikuju i vrši se odabir optimalnog rešenja [3-4].

Poznato je da su kompozitni materijali danas u najvećoj meri zastupljeni u izradi lopatica vetroturbina zbog svojih dobrih karakteristika, kao što su veliki odnos čvrstoća/masa, otpornost na zamor, vibracije, habanje. Visoke strukturalne performanse, uz minimalnu masu (koja obezbeđuje i smanjenje inercijalnih sila), jedni su od zahteva koji se postavljaju prilikom projektovanja lopatica, pa se kompozitni materijali nameću kao najbolji izbor za njihovo ostvarivanje. Najčešće se upotrebljavaju staklena, ugljenična ili aramidna vlakna u kombinaciji sa epoksi ili poliestarskom smolom, koja su dostupna u formi *prepreg* (preimpregniranog) platna. Procesom lamiranja ovih platana dobija se laminatna struktura lopaticе, čije mehaničke karakteristike zavise od parametara - orijentacije vlakana (sloja), tj. rasporeda ređanja slojeva i raspodele debljine slojeva duž lopaticе. Odabir odgovarajućeg materijala, kao i određivanje ovih parametara imaju važnu ulogu u definisanju strukture lopaticе i predmet su istraživanja mnogih autora [5-7], s obzirom da takvi podaci o lopaticama vodećih svetskih proizvođača nisu dostupni.

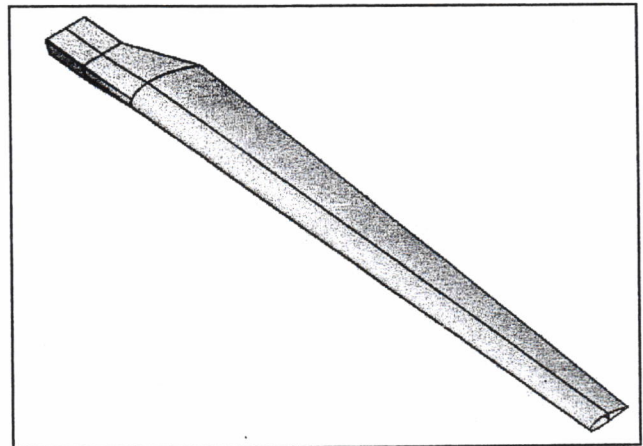
Cilj ovog rada je bio istraživanje u oblasti strukture lopaticе vetroturbine male snage, za koju nam je aerodinamički oblik poznat i nije dalje razmatran, a materijali i unutrašnja struktura su pretpostavljeni tako da zadovoljavaju uslov težine. Formirani modeli su analizirani u komercijalnom softverskom paketu ANSYS primenom metode konačnih elemenata za ekstremni slučaj opterećenja.

2. GEOMETRIJSKI MODEL LOPATICE

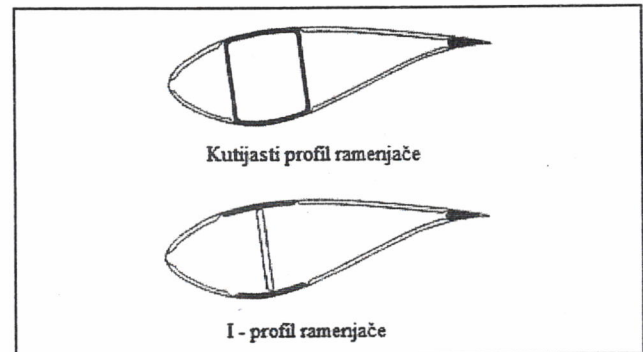
Ukupna dužina realne lopaticе iznosi 6000 mm (geometrijski model je dužine 5894 mm, jer vrh lopaticе nije razmatran), maksimalna dužina tetive je 526mm, minimalna 290 mm. U korenom delu lopaticе korišćen je aeroprofil NACA 4430 iz strukturalnih razloga, a pri vrhu NACA 4420 radi održanja aerodinamičke efikasnosti. 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 lopaticе. Lopatica nije vitoperena, pa se može zaključiti da je polazni geometrijski model prilično jednostavan. Modeliranje je izvršeno u softverskom paketu CATIAv5 (slika 1).

3. KOMPOZITNA STRUKTURA LOPATICE

Struktura tipične lopaticе modernih vetroturbina se sastoji iz spoljašnje oplata koja definiše njen aerodinamički oblik, i ramenjače, elementa koji se prostire u podužnom pravcu u unutrašnjosti lopaticе i nosi deo savijanja. Dva tipa ramenjača dominiraju u konstruisanju strukture lopaticе (slika 2) – ramenjača kutijastog oblika i ramenjača u obliku I-profila, koja je i zastupljena kod lopaticа manjih dimenzija, pa



Slika 1. - Geometrijski model lopaticе



Slika 2. - Dva osnovna oblika ramenjače

je iz tog razloga i usvojena za unutrašnju konstrukciju lopaticе koja je razmatrana u radu. Dimenzije ramenjače (debljina zida, debljina i širina pojaseva) imaju značajni uticaj na čvrstoću/krutost i ukupnu masu lopaticе [8]. Kako bi se obezbedila stabilnost lopaticе pod uticajem različitih slučajeva opterećenja projektovana debljina zida ramenjače je veća u odnosu na debljinu oplata. S obzirom da je jedan od glavnih uslova pri projektovanju strukture lopaticе minimalna masa, kompozitna ramenjača sendvič konstrukcije u ovom smislu ostvaruje uštedu, uz odlične performanse. Ovakva konstrukcija se sastoji od dva noseća sloja, najčešće *prepreg* platna, i ispune (jezgra) za koje se uglavnom biraju razni penasti materijal: balsa drvo, stiropor. Sendvič konstrukcije se mogu koristiti i u predelima napadne ili izlazne ivice kako bi se smanjila mogućnost uvijanja, ali i na drugim mestima duž lopaticе kako bi se uštedelo na težini a povećala tražena otpornost [9-11].

Raspodelu debljine slojeva, odnosno oplata, u strukturi lopaticе takođe treba pažljivo odrediti. Koreni deo koji predstavlja vezu sa glavčinom rotora i prelazni deo sa cilindričnog/četvrtastog na aeroprofilisani deo lopaticе su mesta na kojima se javljaju najveći naponi, pa zato maksimalna debljina oplata treba da bude upravo u tom delu. Jedan od načina određivanja raspodele debljine oplata u preliminarnom dizajnu strukture prikazan je u radu [12].

Već je napomenuto da se u izradi lopaticа najviše koriste kompoziti ojačani vlaknima da bi se ostvario

Tabela 1. - Mehaničke karakteristike materijala

Materijal	Unidirekcionni E-staklo/epoksi	Pena	Unidirekcionni A130 [13]	DB120 [13]
ρ (kg/m ³)	2100	200	1714	1714
E_x (MPa)	60 000	80	31 700	26 200
E_y (MPa)	13 000	80	7580	6500
E_z (MPa)	13 000	20	7580	6500
ν_{xy}	0.3	0.35	0.32	0.39
ν_{yz}	0.4	0.35	0.32	0.35
ν_{xz}	0.3	0.35	0.32	0.32
G_{xy} (MPa)	4000	29	3450	4140
G_{yz} (MPa)	4600	29	3100	3720
G_{xz} (MPa)	4600	29	3100	3720

čvrst dizajn koji će biti dugog radnog veka, a što manje mase. Pregledom opsežne literature zaključeno je da su u upotrebi uglavnom staklena i ugljenična vlakna, pa su za dizajn prikazan u ovom radu izabrana vlakna od E-stakla u kombinaciji sa epoksi smolom, prvenstveno zbog niske cene, jednostavnosti proizvodnje, zadovoljavajućeg zamornog veka i čvrstoće. Vlakna su najčešće postavljena pod uglovima od 0°, +45° i -45°, tako da se 0° poklapa sa podužnom osom lopatice. Slojevi orijentisani pod uglom od 0° se koriste kao otpor savijanju, dok se pod ±45° postavljaju slojevi za povećanje torzione krutosti i otpornosti na izvijanje.

U ovom radu formirana su dva modela strukture čije su karakteristike prikazane u tabeli 2. Za definisanje laminata korišćena su četiri linearno-elastična materijala različitih karakteristika; dve staklo/epoksi lamine sa unidirekcionnim vlaknima, jedna staklo/epoksi lamina čija su vlakna postavljena pod uglom +45° (ovi materijali su zadavani kao ortotropni), i jedan izotropni materijal koji je korišćen u strukturi zida ramenjače. Mehaničke karakteristike materijala date su u tabeli 1; E predstavlja Jungov moduo elastičnosti za tri

glavna pravca, ν Poasonov koeficijent i G moduo smicanja u datim ravnima. Geometrijski model lopatice je podeljen na pet segmenata po kojima je formiran kompozit različite debljine – prvi podrazumeva koreni deo, dok je aeroprofilisani deo lopatice podeljen na četiri jednaka segmenta.

Treba napomenuti da je zadati uslov težine lopatice iznosio 75 kg, što je u oba slučaja približno postignuto; za prvi model strukture težina iznosi 76.2 kg, dok je u drugom slučaju težina lopatice 75.72 kg.

4. MKE ANALIZA I REZULTATI

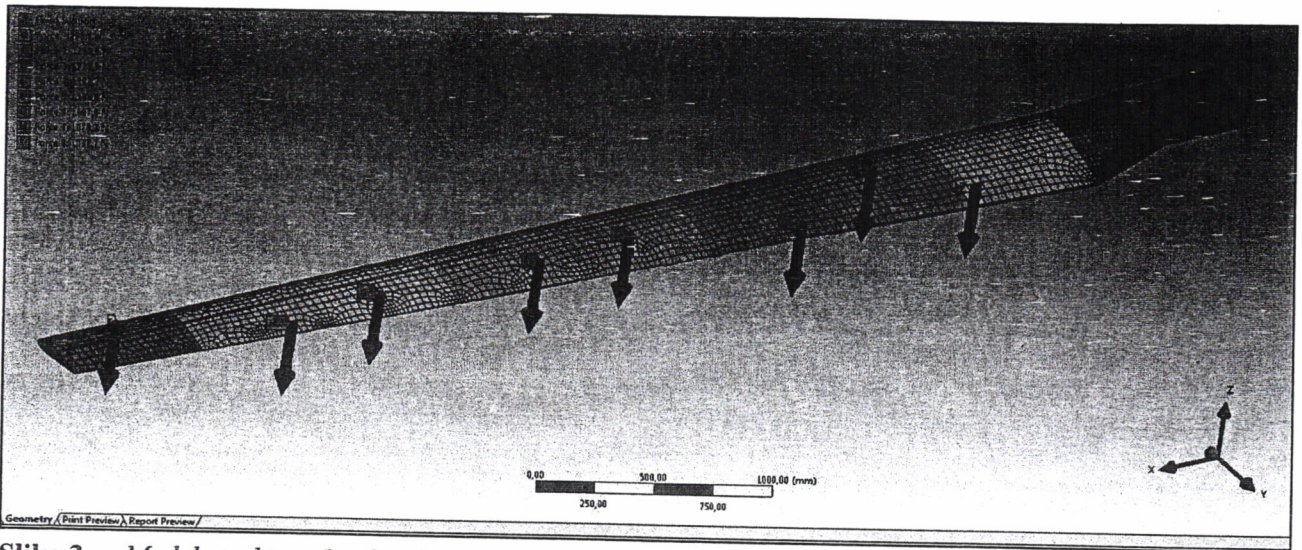
Za proračun strukture kompozitne lopatice korišćen je softverski paket ANSYS Mechanical. Lopatica je posmatrana kao prosta greda uklještena u korenem delu i opterećena na savijanje. U realnosti je opterećenje kontinualno raspoređeno duž lopatice. Za potrebe numeričkog proračuna kontinualno opterećenje je diskretizovano. Sa dijagrama momenata koji nam je bio dostupan, za najopterećeniji slučaj, dobijene su vrednosti sila za 8 preseka, tabela 3. Aero-

Tabela 2. - Pretpostavljena struktura lopatice

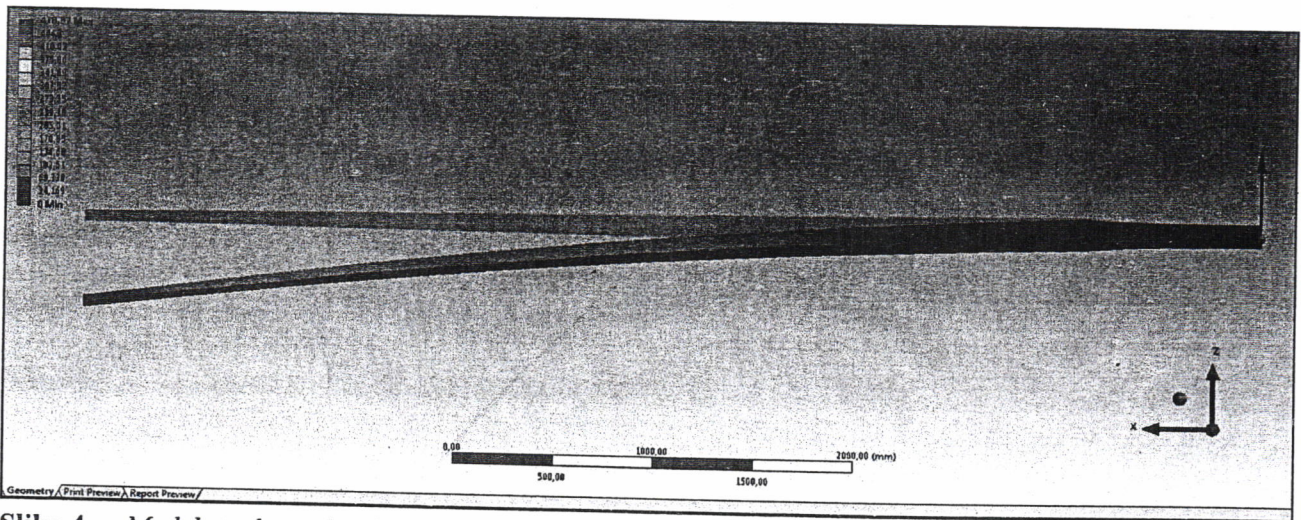
MODEL 1				
Segment	r (mm)	Šema ređanja lamina	Debljina laminata (mm)	Materijal
Koreni deo	0 – 901	[(0/90) ₆] _s	10.4	UD E-staklo/epoksi
Aeroprofilisani deo 1	901 – 2149.25	[(0/45/0/-45/0) ₄] _s	8.8	UD E-staklo/epoksi
Aeroprofilisani deo 2	2149.25 – 3397.5	[(0/45/0/-45/0) ₃] _s	6.8	UD E-staklo/epoksi
Aeroprofilisani deo 3	3397.5 – 4645.75	[(0/45/0/-45/0) ₂] _s	4.4	UD E-staklo/epoksi
Aeroprofilisani deo 4	4645.75 – 5894	[0/45/0/-45/0] _s	2.1	UD E-staklo/epoksi
Ramenjača	901 – 5894	[-30/0/30/0/-30/0/30/pena] _s	14	UD/Pena/UD
MODEL 2				
Segment	r (mm)	Šema ređanja lamina ^[9]	Debljina laminata (mm)	Materijal
Koreni deo	0 – 901	[±45/0 _s /±45/0 _s /+45] _s	16	A130-0°/ DB120-+45°
Aeroprofilisani deo 1	901 – 2149.25	[±45/0 ₄ /±45/0 ₄ /+45] _s	10.5	A130-0°/ DB120-+45°
Aeroprofilisani deo 2	2149.25 – 3397.5	[±45/0 ₃ /±45/0 ₃ /+45] _s	7.25	A130-0°/ DB120-+45°
Aeroprofilisani deo 3	3397.5 – 4645.75	[±45/0 ₂ /±45/0 ₂ /+45] _s	4	A130-0°/ DB120-+45°
Aeroprofilisani deo 4	4645.75 – 5894	[±45/0/±45/0/+45] _s	2	A130-0°/ DB120-+45°
Ramenjača	901 – 5894	[±45/0/±45/0/+45] _s	3.5	A130-0°/ DB120-+45°

Tabela 3. - Raspodela opterećenja lopatice

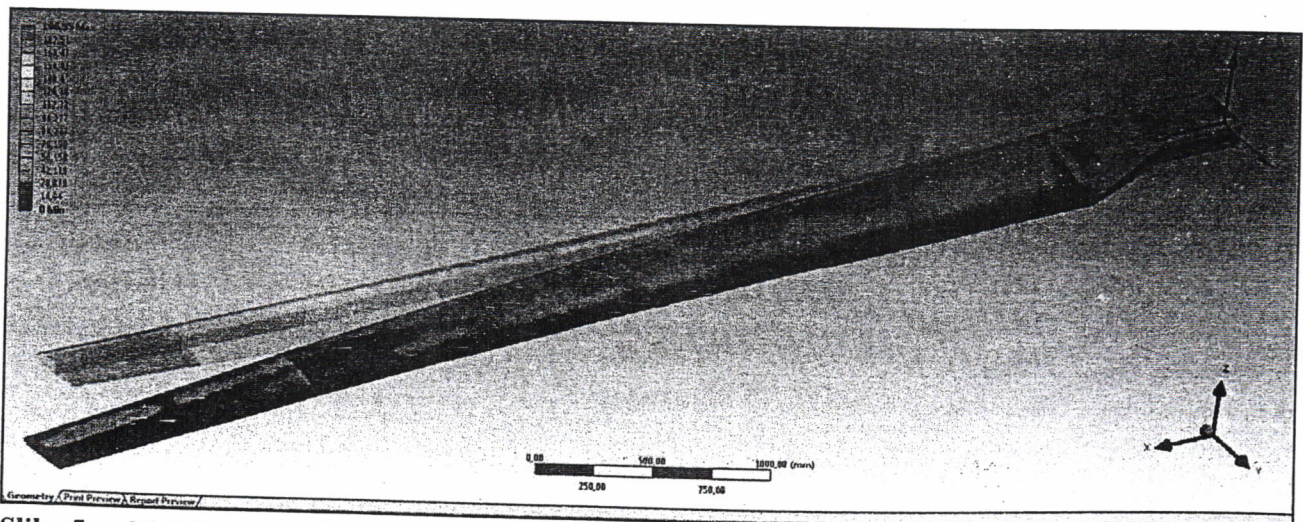
br. segm.	1	2	3	4	5	6	7	8
r [cm]	92,925	153,775	214,625	275,475	336,325	397,175	458,025	518,875
F [daN]	129,6171	125,8536	122,0902	118,3267	114,5633	110,7998	107,0364	103,2729



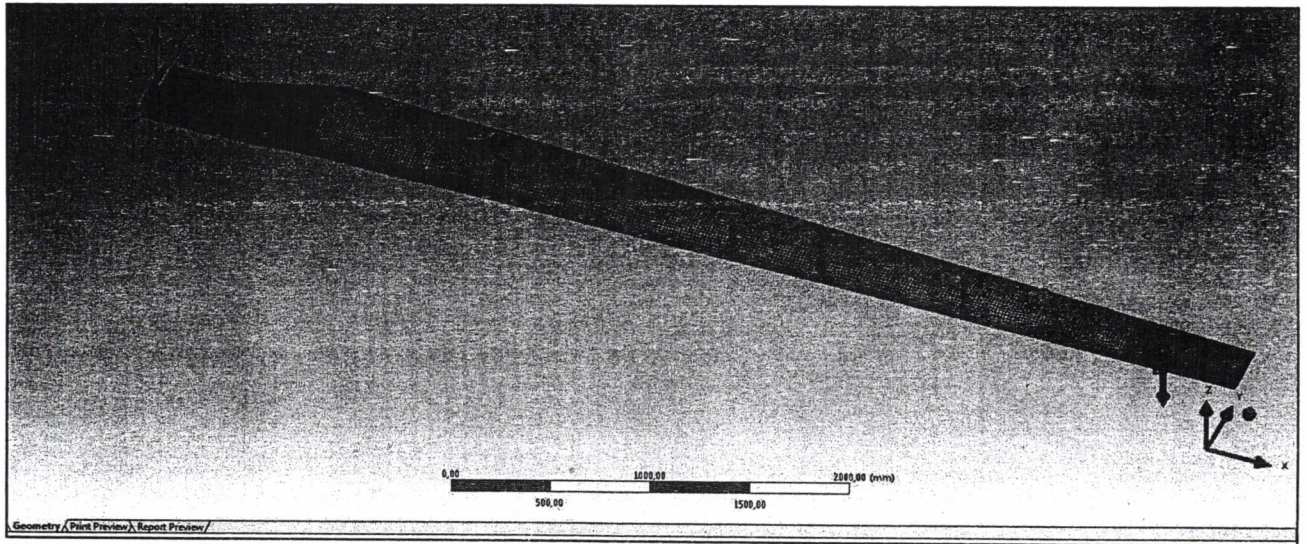
Slika 3. - Model strukture 1 – formirana mreža i zadato opterećenje



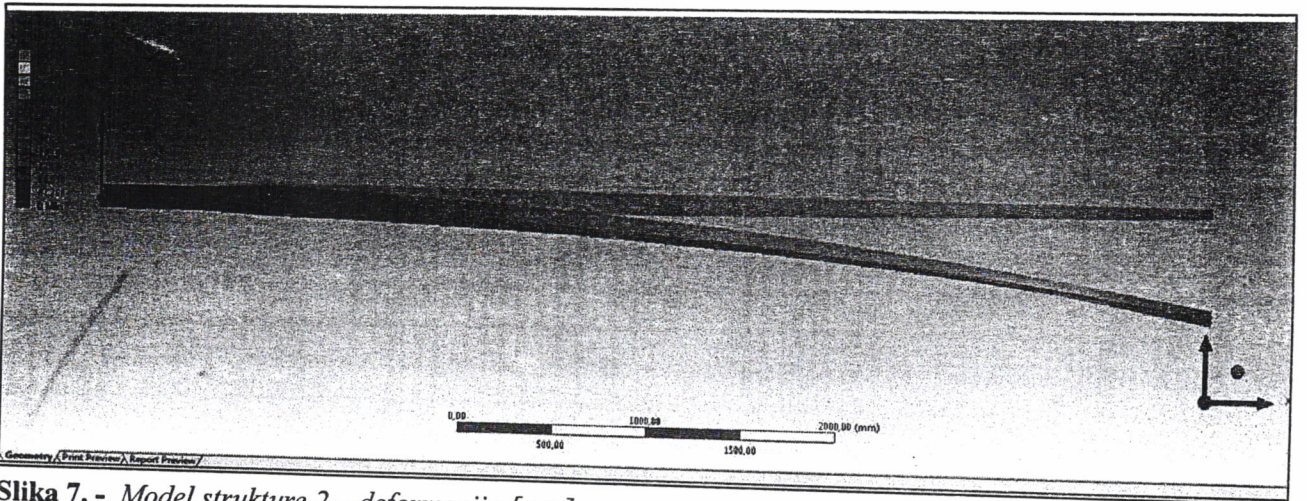
Slika 4. - Model strukture 1 – deformacija [mm]



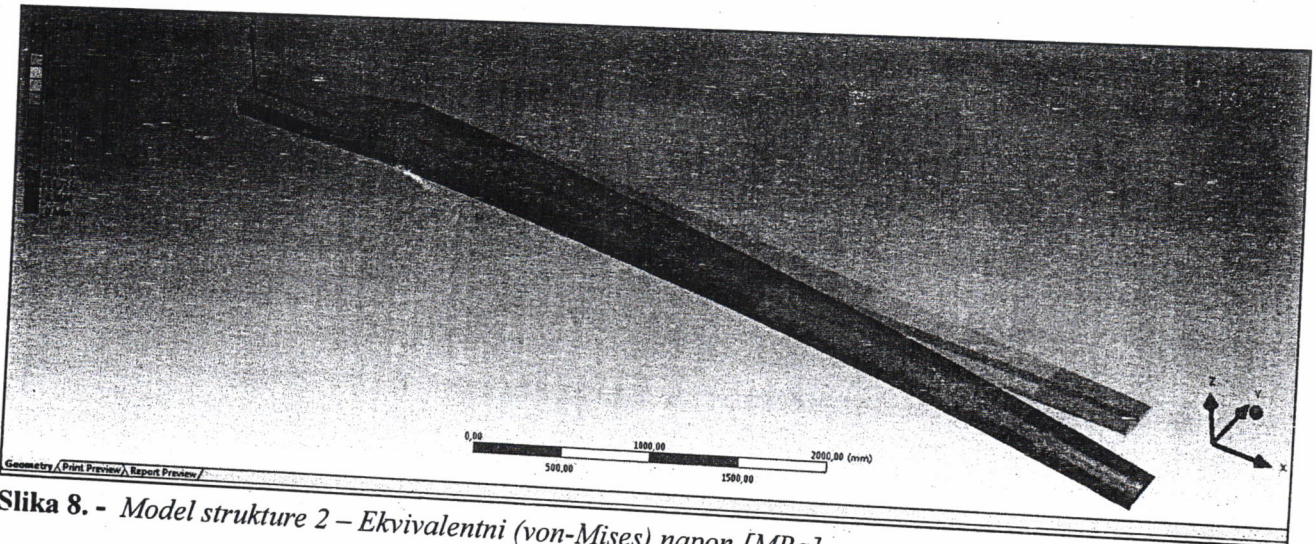
Slika 5. - Model strukture 1 – Ekvivalentni (von-Mises) napon [MPa]



Slika 6. - Model strukture 2 – formirana mreža i zadato opterećenje



Slika 7. - Model strukture 2 – deformacija [mm]



Slika 8. - Model strukture 2 – Ekvivalentni (von-Mises) napon [MPa]

profilisani deo lopatice je podeljen na 8 segmenata i sile su raspoređene tj. zadavane po površinama svakog segmenta, a ne kao koncentrisane (slika 3).

Na slici 3. takođe možemo videti generisanu mrežu modela 1 predložene strukture, za koju su usvojeni

ponuđeni parametri mreže i koja se sastoji iz 11347 elemenata, za razliku modela 2 za čiju mrežu su zadate određene funkcije veličine mreže i koja ima znatno više elemata, 29433, slika 6. Dalje uslozňjavanje mreže bi dovelo do tačnijih rezultata, ali i dužeg proračuna, pa u ovom radu nije razmatrano.

Možemo primetiti da se dobijeni rezultati razlikuju. Maksimalna pomeranja su na krajevima lopatica, i za prvi model strukture iznosi 478.37 mm, dok je za drugi model nešto veće i iznosi 605.75 mm. Veruje se da su veći moduo elastičnosti unidirekcionog materijala korišćenog u prvom slučaju, kao i odabrana šema ređanja slojeva [0/90] doprinele manjoj vrednosti ugiba modela 1.

Maksimalni napon se očekivano javlja u korenem delu lopatice. Za prvi model iznosi 196.55 MPa, dok je za drugi dobijena znatno manja vrednost od 96 MPa, što je rezultat drugačije raspodele debljine slojeva. Kritičan deo u oba slučaja, u kojem su naponi nešto veći, predstavlja predeo ramenjače, što se može objasniti modeliranjem pojednostavljene geometrije lopatice, bez pojaseva ramenjače koji pružaju dodatno ojačanje.

5. ZAKLJUČAK

Strukturalni dizajn lopatice predstavlja složen proces koji ima veliki uticaj na njene opšte performanse. Prilikom definisanja strukture u razmatranje se uzima veliki broj parametara, kao što su čvrstoća, stabilnost, vibracije, ukupna masa, cena materijala i procesa proizvodnje, itd. Optimalno rešenje konstrukcije se uvek nalazi variranjem određenog broja parametara uz zadate granične uslove, a rezultati se verifikuju upoređivanjem sa dostupnim eksperimentalnim ili realizacijom i testiranjem dobijene. Uzimajući u obzir da je u okviru ovog rada izvestan broj podataka o lopatici, i vetroturbini generalno, bio nedostupan, dobijene rezultate možemo svrstati u preliminarne. Za dalju proveru rezultata potrebno je sprovesti statičko ispitivanje za ista opterećenja.

Cilj istraživanja je bio da ukaže na aktuelni način proračuna naponsko-deformacionog stanja lopatice i mogućnosti kreiranja kompozitne strukture. Detaljnija analiza bi podrazumevala realniji i složeniji geometrijski model (veza lopatice sa glavčinom rotora, spoj ramenjače sa oplatom) i primenu nekog od metoda optimizacije (genetski algoritam, optimizacija rojem čestica, itd.) za određivanje raspodele debljine duž lopatice i najbolje šeme ređanja slojeva. Takođe, korisno bi bilo definisati i neke od kriterijuma loma: maksimalni ugib, maksimalna deformacija, itd. U budućem radu treba se fokusirati i na analizu zamora, modalnu i analizu stabilnosti.

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

- [1] Komarov D, Strupar S, Posteljnijk Z, *Review of the current wind energy technologies and global market*, Journal of Applied Engineering Science; 9(2011)4, 208, 437-448
- [2] Schubel P.J, Crossley R.J, *Wind turbine blade design*, Energies 2012, 5, 3425-3449
- [3] Grujicic M, et al. *Structural-response analysis, fatigue-life prediction, and material selection for 1 MW horizontal axis wind turbine blades*, Journal of Materials Engineering and Performance (2010) 19,790-801
- [4] Bir G, Migliore P, *Preliminary structural design of composite blades for two- and three-blade rotors*, Technical report-500-200-31486, National Renewable Energy Laboratory, Colorado
- [5] Lanting Z, *Research on structural lay-up optimum design of composite wind turbine blade*, Energy Procedia 14 (2012) 637-642
- [6] Roczek A, *Optimization of material layup for wind turbine blade trailing edge panels*, Master's Thesis, Riso DTU National Laboratory for Sustainable Energy, Roskilde, Denmark, 2009.
- [7] Li Z, et al. *Effect of lay-up design on properties of wind turbine blades*, Frontiers of Engineering Mechanics Research 2013, 2 (3):63-70
- [8] Zhu J, Cai X, Pan P, Gu R, *Optimization design of spar cap layup for wind turbine blade*, Frontiers of Structural and Civil Engineering 2012, 6(1): 53-56
- [9] Monte A, Castelli M.R, Benini E, *Multi-objective structural optimization of a HAWT composite blade*, Composite structures 106 (2013) 362-373
- [10] Cox K, Echtermeyer A, *Structural design and analysis of a 10MW wind turbine blade*, Energy Procedia 24 (2012) 194-201
- [11] Chen J, et al. *Structural optimization study of composite wind turbine blade*, Materials and Design 46 (2013) 247-255
- [12] Wu W.H, Young W.B, *Structural analysis and design of the composite wind turbine blade*, Applied Composite Materials (2012) 19:247-257
- [13] Mandell, J. E and Samborsky, D. D. (1997). *DO-EMSU composite material fatigue database: Test methods, materials, and analysis*. Contractor Report SAND97-3002, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM USA.