

Numerička strukturalna analiza kompozitne lopatice vetroturbine

Numerical structural analysis of a composite wind turbine blade

Milica Milić*, Jelena Svorcan*, Vladimir Jazarević**

* Katedra za vazduhoplovstvo, Univerzitet u Beogradu – Mašinski fakultet

** EdePro.do

Apstrakt- Neodrživi porast zahteva za energijom (naročito iz neobnovljivih izvora energije) ima za posledicu velike količine otpada, uništavanje životne sredine i konstantni porast potrošnje neobnovljivih izvora energije.

Sve to sa sobom nosi i porast cena tih resursa. Da bi se ispunili savremeni energetske zahtevi, a samim tim i sačuvala životna sredina, smanjila količina otpada itd. neophodno je investirati u nove tehnologije koje će iskoristiti potencijal obnovljivih izvora energije i tako doprineti efikasnijem iskorišćenju tih resursa. Jedna od danas veoma aktuelnih obnovljivih energija je i energija vetra, odnosno vetrogeneratori kao način za njeno iskorišćenje.

Kinetička energija vetra se može transformisati u obrtno kretanje vratila rotora vetrogeneratora pri dejstvu sila aerodinamičkog otpora i uzgona na lopatice. Lopatice čine rotor koji je osnovna komponenta vetrogeneratora. One su uzgonske površine, čiji je poprečni presek aeroprofil. Odlikuje ih velika vitkost i zakrivljena geometrija. Najčešće su napravljene od kompozitnih materijala, uglavnom od staklenih vlakana. Mogu se aerodinamički optimizovati u zavisnosti od potrebnih radnih režima.

Rad prikazuje simulaciju rada rotora vetroturbine, procenu aerodinamičkih opterećenja koji deluju na lopaticu u standardnim i nestandardnim radnim uslovima, a potom i detaljnu numeričku strukturalnu analizu kompozitne lopatice vetroturbine metodom konačnih elemenata.

Rezultati su prikazani u obliku raspodela napona, pomeranja i kriterijuma loma po lopatici.

Ključne reči- Obnovljivi izvori energije, vetroturbine, kompozitna lopatica, MKE analiza

Abstract- The unsustainable increase in energy demand (especially from non-renewable energy resources) results in large amounts of generated waste, destruction of the environment and constant increase in the consumption of non-renewable energy resources.

All the mentioned aspects induce cost increase of these resources. In order to meet the modern energy requirements and thus preserve the environment, reduce waste etc. it is necessary to invest in new technologies that will harness the potential of renewable energy resources and thus contribute to a more efficient use of these resources. One of the currently attractive types of renewable energy is wind energy, i.e. wind turbines as a way of extracting it.

Kinetic energy of the wind can be transformed into the rotational motion of the wind turbine rotor shaft by the forces of aerodynamic lift and drag acting in the blades. The blades comprise the rotor which is the basic component of the wind turbine. They are lifting surfaces, whose cross section is an airfoil. Blades are characterized by high slenderness and curved geometry. They are usually made of composite materials, in particular glass fibers. Blades can be optimized with respect to aerodynamics depending on the required operating regimes.

The paper presents the simulation of wind turbine rotor operation, estimation of aerodynamic loads acting on the blade under standard and non-standard operating conditions, followed by a detailed numerical structural analysis of the composite wind turbine blade using the finite element method.

The obtained results are illustrated in the shape of stress, displacements and failure criteria fields distribution along the blade.

Index Terms- Renewable energy resources, wind turbines, composite blade, FEA

I. UVOD

Potencijal obnovljivog izvora energije, vetra, najbolje je iskorišćen uz pomoć vetrogeneratora, tj. vetroturbina. Prema konstrukcionim karakteristikama vetroturbine je moguće podeliti u dve grupe:

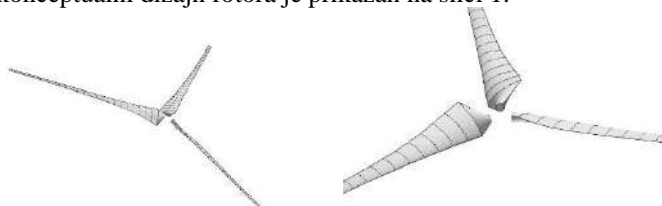
vetroturbine sa horizontalnom osom obrtanja (VHO, HAWT) i vetroturbine sa vertikalnom osom obrtanja (VVO, VAWT).

U ovom radu biće prikazan postupak strukturalne analize lopatice HAWT. [1,2,3].

Ove vetroturbine sastoje se iz vertikalnog stuba, rotora i elektrogeneratora, s tim što je vratilo rotora horizontalno postavljeno. Klasične HAWT se najčešće izrađuju, u konstruktivnom smislu sa dve ili tri lopatice iako su i retki slučajevi konstruktivnih rešenja sa jednom lopaticom.

Klasičnu HAWT sa tri lopatice, uglavnom odlikuju: veliki stepen iskorišćenosti, velika snaga koju mogu da proizvedu, velika pouzdanost sistema, što je posledica malog momenta pokretanja. Ovakav tip vetroturbine se najčešće koristi za napajanje električne mreže. Najbitniji aspekti koji se razmatraju kada je u pitanju najbolje iskoršćenje kapaciteta vetroturbine, kao i proračun godišnje proizvodnje energije su odlična procena raspodela vetra u toku godine na samom području, a zatim i finansijska procena isplativosti postavljanja vetroparka. [4].

U ovom radu analizirana je lopatica rotora prečnika $D=50$ m, konceptualni dizajn rotora je prikazan na slici 1.

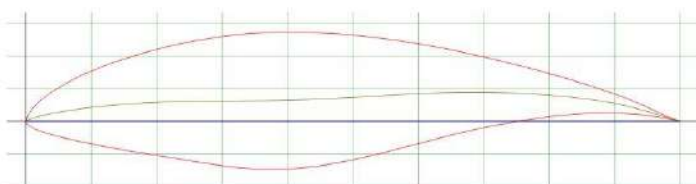


Slika 1. Konceptualni dizajn rotora

Slučaj opterećenja za koji će biti ispitana lopatica je analogno statičkom testu lopatice, gde je ona u zakočenom položaju i na nju deluje samo opterećenje vetra, velikog intenziteta od 30 m/s. [5]. Lopatica je napravljena od kompozita, od slojeva karbonskih i staklenih vlakana u epoksi matrici (smoli) sa penastom ispunom, tzv. sendvič konstrukcija.

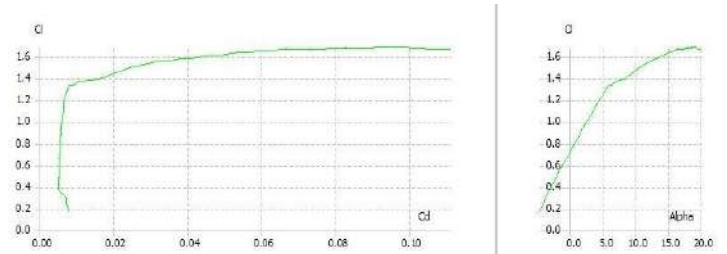
II. OPIS PARAMETARA MODELA

Kako bi se na najbolji način razmotrila geometrija same lopatice, bilo je bitno, pre svega usvojiti aeroprofil, koji će zadovoljiti željene performanse. Izabrani aeroprofil je NREL-ov S830, maksimalne relativne debljine 21% smeštene na 38,4% tetive i maksimalnog koeficijenta uzgona oko 1.6, posebno projektovan za lopatice vetroturbina koje rade pri 4 MRe, koji je prikazan na slici 2.



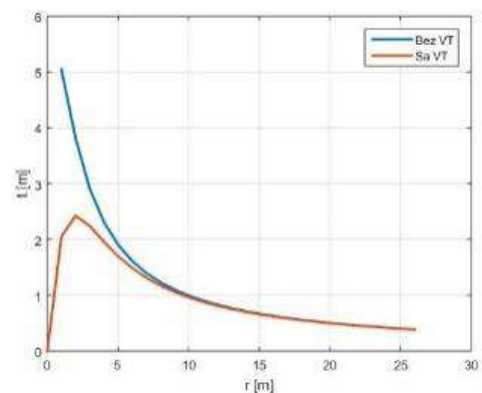
Slika 2. Aeroprofil S830

Uz pomoć otvorenih kodova XFOIL i QBlade, određeni su aerodinamički parametri aeroprofila za Reynoldsov broj $Re=3.9755e+6$ i Mahov broj $M=0.3505$. Proračunate aerodinamičke karakteristike aeroprofila C_l – koeficijent uzgona, C_d – koeficijent otpora u zavisnosti od napadnog ugla α , prikazane su na slici 3.

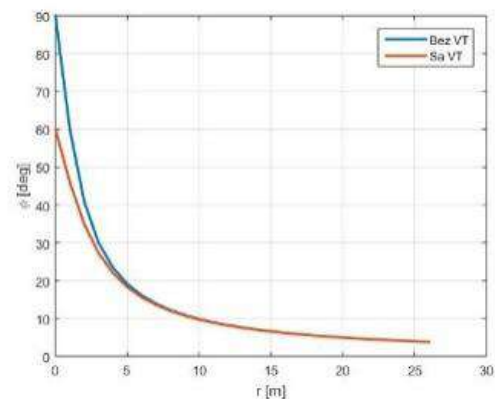


Slika 3. Proračunate aerodinamičke karakteristike aeroprofila

Kako bi modeliranje lopatice rotora bilo moguće, neophodni podaci su vrednost tetive i aerodinamičkog napadnog ugla na svakom delu lopatice sa ili bez vrtložnog traga. Primenom teorije idealnog rotora, gde svaki segment lopatice radi u optimalnom radnom režimu pri maksimalnoj vrednosti finese, dobijene su potrebne vrednosti, to se može videti na slici 4a i slici 4b.



Slika 4a. Vrednosti tetive



Slika 4b. Vrednosti aerodinamičkog nagibnog ugla

A. Pravljenje geometrijskog modela

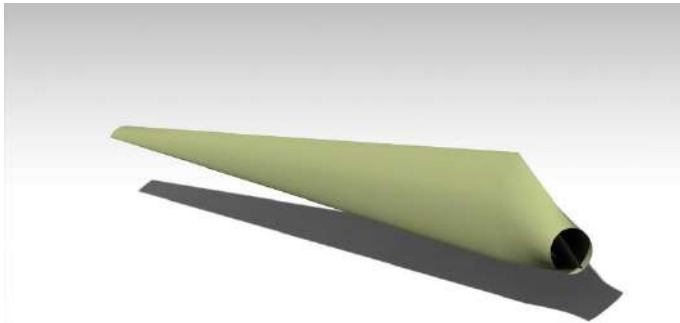
Model lopatice realizovan je u komercijalnom softverskom paketu CATIA, u okviru modula Generative Shape Design.

Model je parametrizovan, da bi postojala mogućnost optimizacije geometrije.

Parametri lopatice, prikazani u tabeli su: R – dužina lopatice, ϕ – ugao vitoperenja, L – tetiva aeroprofila, n – suženje.

Tabela 1. Parametri lopatice

R	D	ϕ	L	n
mm	mm	°	mm	-
25 000	50 000	45	2400	5



Slika 5. Model lopatice

III. PROCENA AERODINAMIČKOG OPTEREĆENJA

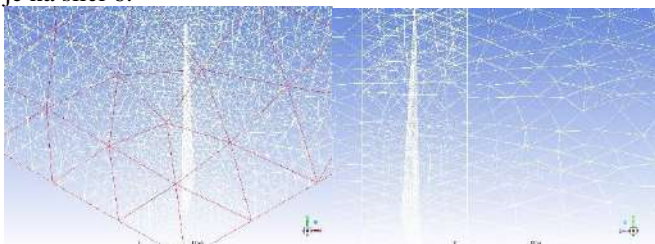
Cilj ovog rada je da se pokaže da je lopatica konstruisana tako da može da izdrži ekstremni slučaj opterećenja, kada duva jak, nekontrolisani vetar, velikim brzinama, koji se javlja u nekom određenom periodu (jednom godišnje). Da bi ta simulacija bila moguća, potrebno je naći raspodelu pritiska koji deluje na lopaticu. U ovom radu, zanemariće se ugaona brzina lopatice i model će biti tretiran kao nepokretan, tako da će rezultat biti pritisak vazduha koji deluje na lopaticu dok opstrujava zakočeni rotor. Korišćenjem softverskog paketa ANSYS, potrebna raspodela pritiska dobijena je na sledeći način.

A. Definisane domena i proračunska mreža

Svi geometrijski modeli su 3D (prostorni), tačnije domen se sastoji iz prostora unutar kog se nalazi lopatica. Domen je fluid, granice i delovi proračunskog domena: ulaz – *inlet*, izlaz – *outlet*, lopatica – *wall_blade*.

Proračunska mreža, od koje zavisi i preciznost samog proračuna, definisana je u ANSYS Meshing-u. Korišćen je parameter za finoću mreže *Relevance* = 100, takođe i *Advanced Size functions On: Proximity and Curvature, Relevance Center* za još finiju mrežu.

Proračunska mreža referentnog modela ima 377671 i prikazana je na slici 6.



Slika 6. Proračunska mreža referentnog modela

B. Numerička postavka

U softverskom paketu ANSYS Fluentu urađena simulacija metodom konačnih zapremina, strujanje je stacionarno i turbulentno, turbulentni model kwSST. Kada je reč o graničnim uslovima, brzina na ulazu je 30 m/s, duž z -ose, dok je pritisak na izlazu jednak atmosferskom. Za proračun korišćena je SIMPLE šema 2. reda tačnosti. Za postizanje konvergencije bilo je potrebno 1000 iteracija, do V_{max} .

C. Struktura modela

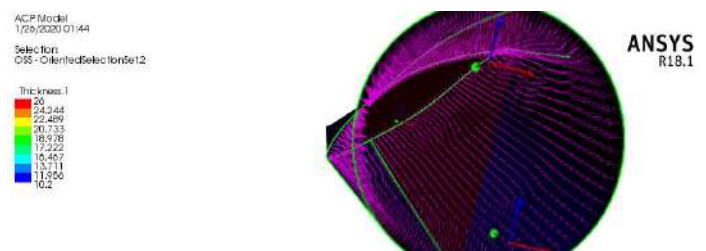
Kada je reč o strukturi, model lopatice je napravljen od kompozitnih materijala. Oni čine kombinaciju makar dve komponente i čije su globalne mehaničke karakteristike bolje od pojedinačnih komponenti. Noseću ulogu vrše vlakna (staklena, karbonska, aramidna...) koja mogu biti uronjena u različite vrste smola čija je osnovna uloga da zaštite vlakna, vrše prenos opterećenja između vlakana i definišu oblik spoljašnje geometrije. Najčešće se koriste u vidu laminata i sendvič konstrukcija. Ovi materijali imaju velike module elastičnosti i veliku zateznu čvrstoću, otporni su na zamor, takođe su veoma dobri provodnici električne i toplotne energije.

U okviru ANSYS ACP (Pre) modulu urađena je priprema geometrije, definisana orijentacija vlakana i postavka slojeva (lamina), laminata od kojih je napravljena oplata i ramenjača.

Usvojeni kompozitni materijali i njihove karakteristike: E_1 i E_2 – moduli elastičnosti po dva osnovna upravna pravca, G_{12} – modul smicanja, ν_{12} i ν_{21} – Poasonovi koeficijenti po dva osnovna pravca, koji su korišćeni za model lopatice u ovom radu, dati su u tabeli 2. U tabeli se može uočiti, da karbon ima bolje mehaničke karakteristike od stakla, ali isto tako i veću cenu, pa je sa aspekta isplativosti projekta, još uvek zastupljenije staklo.

AS4 Carbon/3501 – 6 Epoxy, $V_f = 0.6$				
E_1 [MPa]	E_2 [MPa]	G_{12} [MPa]	ν_{12}	ν_{21}
136680	7394.4	3386.8	0.256	0.01385
E – Glass/3501 – 6 Epoxy, $V_f = 0.6$				
E_1 [MPa]	E_2 [MPa]	G_{12} [MPa]	ν_{12}	
49680	9733	3659	0.256	
Rohacell				
E [MPa]		G [MPa]		
36		13		

Tabela 2. Usvojeni kompozitni materijali
Na slici 7. Prikazana je orijentacija vlakana, elemenata oplata.



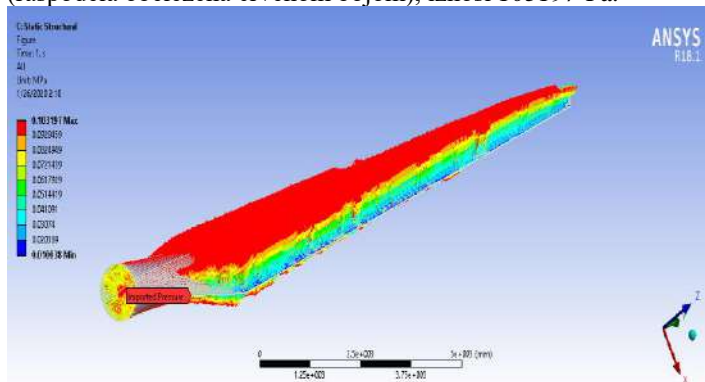
Slika 7. Orijetacija vlakana

Oplata lopatice se sastoji iz pet slojeva, koje su kombinacija karbonskih i staklenih vlakana, između kojih se nalazi prethodno navedena ispuna.

Ramenjača se sastoji iz tri sloja karbonskih vlakana i ispune. Lamine su simetrično postavljene u lamini. Konačnoelementni model sastoji se iz 32008 elemenata, pravougaonog oblika.

IV. REZULTATI I DISKUSIJA

Nakon definisanja materijala i postavljanja konturnih uslova, gde se veza lopatica-rotor smatra nepokretnom i tu je postavljen uslov *fixed support*. Dobijeni rezultati raspodele pritiska po lopatici, prikazani su na slici 8. Maksimalna vrednost pritiska (raspodela obeležena crvenom bojom), iznosi 103197 Pa.

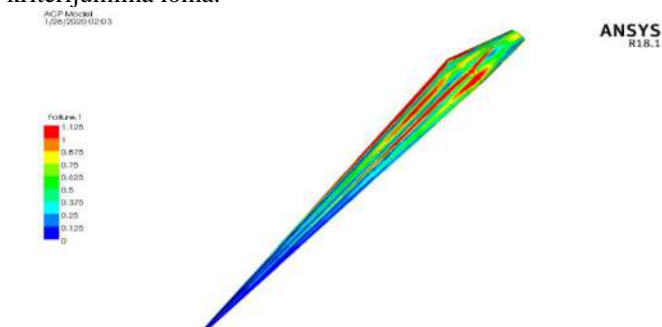


Slika 8. Opterećenje koje deluje na lopaticu

Nakon statičke analize, u ANSYS ACP (Post) modulu, može se videti kolika su pomeranja same lopaticice, kao i koliki su inverzni stepeni sigurnosti. Kod kompozitnih materijala za razliku od aluminijuma ili nekog drugog izotropnog materijala, ne možemo primeniti kriterijum maksimalnih napona.

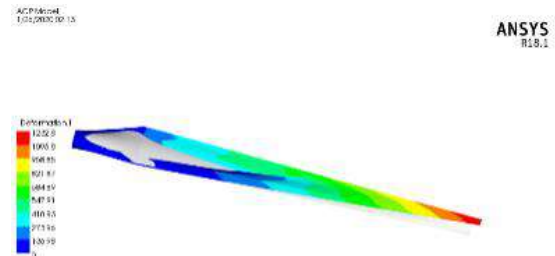
Na mestima gde su inverzni stepeni sigurnosti veći od jedan, potrebno je dodatno ojačati ili preformulisati slojeve, kao i orijentaciju vlakana u samim laminama, jer oni imaju direktnu vezu sa naponima koji će se tu javiti.

U ovom radu, na osnovu analiza može se videti da ovako projektovana lopatica ne može da izdrži pritisak koji nastaje od opstrujavanja vetra brzinom od 30 m/s i da će doći do loma konstrukcije. Slika 9, pokazuje inverzne stepene sigurnosti, po kriterijumima loma.

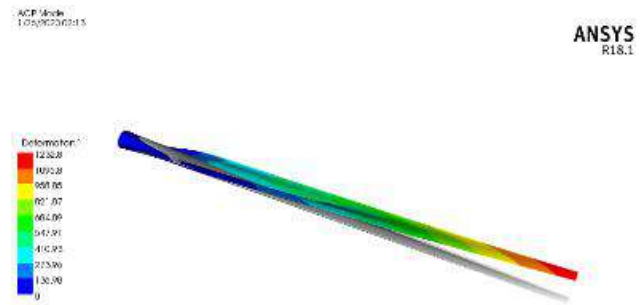


Slika 9. Inverzni stepeni sigurnosti po kriterijumu loma.

Pomeranja strukture, najviše su izražena u smeru dejstva opterećenja i dovode do savijanja lopaticice po z-osi. Prikaz pomeranja structure nalazi se na slici 10a i slici 10b.



Slika 10a. Pomeranja structure lopaticice



Slika 10b. Pomeranja structure lopaticice

Maksimalna vrednost pomeranja vrha lopaticice iznosi 1232.8 mm, to pomeranje u odnosu na same dimenzije lopaticice nije veliko i moglo bi se razmatrati kao prihvatljivo, ali po inverznim stepenima sigurnosti može se zaključiti da će do loma doći na strukturi bliže korenu lopaticice, što je i logično zbog koncentracije napona na mestu gde struktura nije dovoljno kruta.

V. ZAKLJUČAK

Istiknutost nakon ovog rada, je da je potrebno detaljnije istražiti mogućnost primene materijala, kao i samu kombinaciju materijala, sa aspekta čvrstoće. Takođe rezultat je očekivan, pa se samim tim numerička analiza može verifikovati sa testiranjem na pravom modelu. Ovaj rad ostavlja prostor za optimizaciju parametara same geometrije, kao što su: relativna debljina aeroprofila, dužina lopaticice, kao i aerodinamički napadni ugao.

Sledeći koraci u analizi, bili bi:

1. Korišćenje nekih drugih šema i modela za proračun i diskretizaciju domena, radi uporedne analize rezultata.
2. Za iste vrednosti brzine vetra uvesti ugaonu brzinu samog rotora, pa zatim analizirati promene i fenomene do kojih će doći pri velikim brzinama vetra i predviđenim ugaonim brzinama.
3. Optimizacija geometrije lopaticice.
4. Preraspodela lamina u laminatu, kao i sama orijentacija vlakana unutar lamine.
5. Ispitivanje mogućnosti dodavanja dodatnih strukturnih elemenata kao što je još jedna ramenjača ili određeni broj rebra.

REFERENCE

- [1] Umid Mamadaminov, "Review of Aerofoil Structure for Wind Turbine Blades" Department of Electrical Engineering and Renewable Energy, REE 515: Energz Engineering I, Fall, 2013.
- [2] Akhil P Mathew, Athul S., Barath P., Pakesh S., "Structural analysis of composite wind turbine blade" in *International Research Journal of Engineering and Tehnology*, vol. 05. 2018.
- [3] Vipin Kumar Singh, Tiju.T.Thomas, Vilas Waeudkar., "Structural Design of a Wind Turbine Blade: A Review," in *International Journal of ChemTech Research*, vol. 5, 2013, pp. 2443-2448.
- [4] McGugan, Malcolm "Design of Wind Turbine Blades" in *MARE-WINT. New materials and Reliability in Offshore Wind Turbine Tehnology*.
- [5] "International standard IEC 61400-2" Edition 3.0 2013-12.

AUTORI

Prvi autor – Milica Milić, mast.inž.maš, Univerzitet u Beogradu – Mašinski fakultet, mmilic@mas.bg.ac.rs.

Drugi autor – dr Jelena Svorcan, mast.inž.maš, Univerzitet u Beogradu – Mašinski fakultet, jsvorcan@mas.bg.ac.rs.

Treći autor – dr Vladimir Jazarević, dipl.inž.maš, EDePro doo., Kralja Milutina 33, 11000 Belgrade, vladimir.jazarevic@edepro.com.

Dopisni autor – Milica Milić, mast.inž.maš, Univerzitet u Beogradu – Mašinski fakultet, mmilic@mas.bg.ac.rs