

Tanović D., Svorcan J., Peković O., Hasan M.S. ¹⁾

ANALIZA PERFORMANSI VETROTURBINA RAZLIČITIH AEROPROFILA ²⁾

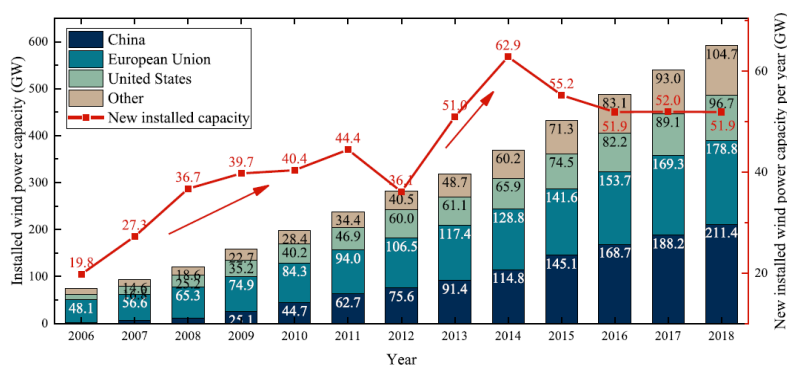
Rezime

Rastuća zabrinutost zbog globalnog zagrevanja, zagađenja životne sredine i poskupljenja fosilnih goriva doveli su do interesovanja za razvoj obnovljivih i ekološki prihvatljivih izvora energije. Stoga istraživanja u oblasti obnovljivih izvora, posebno energije vetra, postaju izuzetno aktuelna. U radu je izvršena aerodinamička analiza vetroturbin sa vertikalnom osom obrtanja - VAWT, koje imaju različite aeroprofile. Korišćene su dve metode BEM - Blade Element Momentum i DMS - Double Multiple Streamtube, obično usvojene za rani dizajn i ocenu turbina. U radu je korišćen program Qblade, a dobijeni rezultati snage u zavisnosti od brzine vetra omogućavaju upoređivanje performansi vetroturbin.

Ključne reči: QBlade, vetroturбина, aeroprofile, obnovljivi izvori energije

1. UVOD

Vetar je bogat energetski resurs koji pokreće Sunce. Procenjuje se da se oko 3% sunčeve toplotne energije pretvara u energiju vetra [1]. Među svim tehnologijama baziranim na ekološkoj zaštiti sredine i obnovljivim izvorima energije, energija vetra ima vitalnu ulogu. Sa razlogom veliki broj istraživačkih projekata se bavi projektovanjem i proizvodnjom vetroturbin. Godišnji porast instaliranih kapaciteta vetroturbin u svetu je prikazan na sl.1.



Slika 1. Instalirani kapaciteti vetroturbin u periodu između 2006. i 2018. godine [2]

Energija vetra se smatra jednom od vodećih obnovljivih izvora energije koja ima minimalan i prihvatljiv uticaj na okolinu u kojoj se nalazi. Takođe, ne doprinosi povećanju toksina i ostalih štetnih gasova u okruženju. Primena energije vetra promovise održivi razvoj, zadovoljavajući potrebe sadašnjosti bez ugrožavanja sposobnosti budućih generacija da zadovolje svoje potrebe.

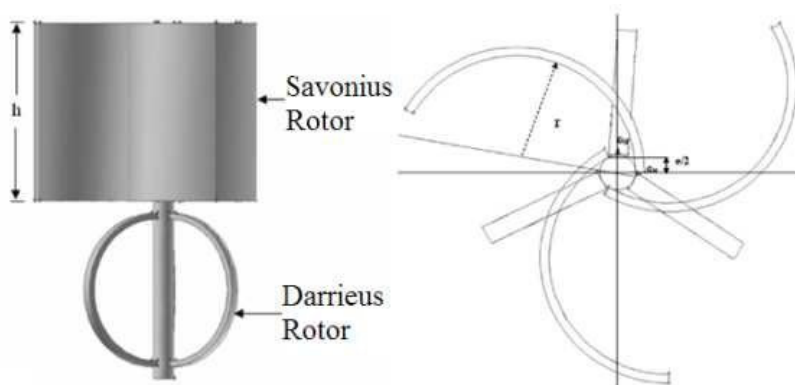
¹⁾ MSc Dragoljub Tanović, student DAS, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (dtanovic@mas.bg.ac.rs), dr Jelena Svorcan, vanr. prof., Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (jsvorcan@mas.bg.ac.rs), dr Ognjen Peković, vanr. prof., Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, (opekovic@mas.bg.ac.rs), MSc Mohammad Sakib Hasan, student DAS, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet (sakibhasan89@yahoo.com)

²⁾ U okviru rada saopšteni su rezultati istraživanja koja se sprovode na projektu TR-35035, Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja.

Danas je jedan od prioritarnih zadataka u oblasti energetike, suspostuisanje fosilnih goriva i nuklearnih elektrana iz upotrebe, koji ne samo da štetno utiču nego i prete da ugroze živi svet u budućnosti. Ova degradacija u kratkom roku ugrožava zdravlje ljudi i kvalitet života i dugoročno utiče na ekološku ravnotežu i biološku raznolikost. Sa druge strane, energija vetra koja se koristi iz prirodnog ekosistema je ekološki neiscrpna. Zahvaljujući sve većim naporima globalnih zajednica u borbi protiv emisije gasova sa efektom staklene bašte iz konvencionalnih tehnologija fosilnih goriva, primene vetroturbina imaće sve značajniju ulogu u narednim godinama.

Većina vetroturbina spada u tip sa horizontalnom osom obrtanja (*HAWT*) i danas ih je zastupljeno preko 90% na tržištu [3]. Vetroturbine sa vertikalnom osom obrtanja (*VAWT*) su znatno manje u upotrebi, a samim tim i manje izučavane. Kao što *Gipe* napominje [4], postoji podela na 2 podtipa *VAWT*-a, Savonijusov i Darijusov, mada postoji i nekoliko različitih Darijusovih vetroturbina. Neka od ovih su u fokusu trenutnih istraživanja.

Prve istorijski zapisane informacije datiraju jos davne 945. godine o postojanju vetrenjača na teritoriji nekadašnje Persije i primarno su, snagom vetra, korišćene za mlevenje zrna [5]. Savonijus je, usavršavajući ove vetrenjače razvio svoj tip turbine sa vertikalnom osom obrtanja čije lopatice imaju oblik latiničnog slova „S“. Darijus je 1931. godine patentirao svoj tip u Sjedinjenim Američkim Državama [6]. Iskrivljene lopatice oblika „S“ je zamenio sa najčešće 2 ili 3 čiji poprečni presek je sličan krilu aviona (Slika 2.). Postoje i drugi oblici Darijusove vetroturbine, a kao najbitniji se izdvaja „H“ dizajn. Darijusova „H“ turbina najčešća je konfiguracija vetroturbine sa vertikalnom osom sa pravim, neiskrivljenim lopaticama (*SBVAWT*). Ovaj podtip može imati važnu ulogu u razvoju energije vetra u budućnosti.



Slika 2. Poprečni presek podtipova vetroturbine sa vertikalnom osom obrtanja [7]

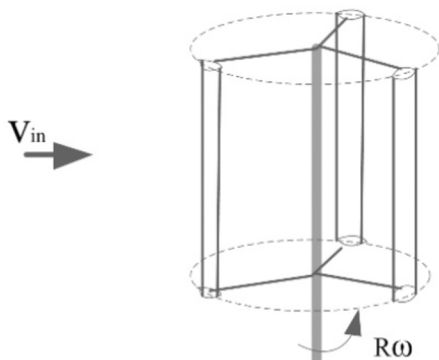
Turbine sa vertikalnom osom obrtanja imaju nekoliko prednosti zbog kojih se poslednjih decenija sve češće koriste. Jedan od najjednostavnijih primera ovog tipa je sa pravim, neiskrivljenim lopaticama-*SBVAWT* što daje mogućnost jednostavne izrade sa odličnim performansama. Budući da se *VAWT* mogu prilagoditi strujanju vetra iz bilo kog pravca, one mogu raditi u turbulentnim i promenljivim uslovima daleko bolje od *HAWT* [8]. Zapravo, *VAWT* često mogu proizvoditi veću količinu energije pri istim uslovima od *HAWT*. Njihova dobra karakteristika je da se mogu postaviti bliže jedna drugoj a da međusobno ne utiču na rad. Ove prednosti su dovele do toga da se u nekim gradskim sredinama uvedu vetroturbine koje uopšte ne utiču na sredinu u kojoj se nalaze [9]. Njihovo kućište, u kome je alternator, nalazi se na zemlji što olakšava održavanje turbine. Neki novi dizajni ovog tipa imaju veći koeficijent snage koji omogućava veću količinu dobijene električne energije. *Marsh* i *Peace* [10] napominju da novi dizajni *VAWT* mogu takođe prevazići granicu od 10 MV jer orijentacija lopatica u kombinaciji sa proizvodnim tehnikama omogućava da se *VAWT* proizvedu gabarita većih od *HAWT*. Međutim, postoje razlozi zašto su *VAWT* manje u upotrebi u odnosu na *HAWT*.

Efikasnost i dalje predstavlja glavni nedostatak upotrebe *VAWT* u komercijalnoj proizvodnji električne energije. Vrhunski *HAWT* mogu ostvariti vrednosti koeficijenta snage (C_p) mnogo veće u odnosu na turbine sa vertikalnom osom obrtanja. Najveći problem predstavlja činjenica da se ovaj tip turbina ne može samopokrenuti, a izrada njihovih lopatica zbog velike složenosti iziskuje velika finansijska ulaganja.

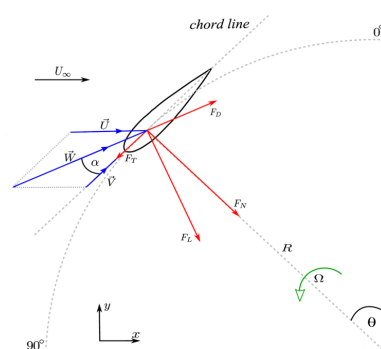
Međutim, istraživanja pokazuju da Darijusova turbina može samostalno da se pokrene pri brzinama vetra ispod 10 m/s [11]. Najčešće se koriste simetrični aeroprofil, jer od svih iz NACA baze daju najbolje rezultate. Razvojem aeroprofila, u proizvodnji vetroturbina našli su primenu i profili S809 i DU 06-W-200.

2. ANALIZA

Princip obrtanja lopaticice oko ose vetroturbine je isti kao obrtanje propela na avionu. Prilikom strujanja vetra (sl.3), na lopaticicu deluje rezultujuća sila koja se može razložiti na dve komponente – silu uzgona i silu otpora (sl.4). Sila uzgona (F_L) predstavlja komponentu aerodinamičke sile koja je upravna na pravac vetra, dok sila otpora (F_D) deluje u smeru kretanja vetra.



Slika 3. Darijusova vetroturbina [12]



Slika 4. Uticaj sile na lopaticicu [13]

U radu je upoređeno 5 različitih aeroprofila (tabela 1.) pri istim karakteristikama vetroturbine. Autori [14] su pokazali da turbina sa 3 lopaticice daje najbolje rezultate što je bio i osnov da u našim istraživanjima analiziramo koncept tri lopaticice pri Rejnoldsovoj i Mahovoj vrednosti od 350000 i 0.03 .

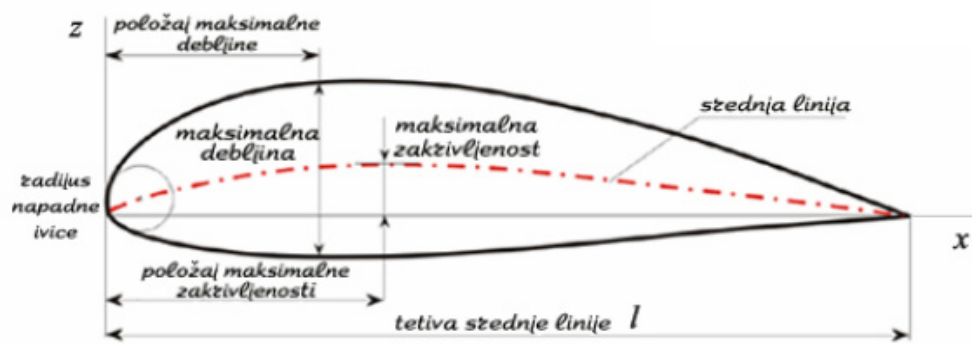
Tabela 1. Karakteristike analizirane vetroturbine

Slučaj	1	2	3	4	5
Aeroprofil	NACA 0012	S809	DU 06-W-200	NACA 2415	NACA 23012
Visina lopaticice (m)	2				
Poluprečnik (m)	1				
Tetiva (m)	0.15				
Mahov broj	0.03				
Rejnoldsov broj	350000				

NACA 0012 (sl.6) je četvorocifreni aeroprofil i jedan od najčešćih eksperimentalno testiranih i korišćenih pri različitim vrednostima Rejnoldsovih brojeva. Spada u aeroprofile gde prve dve vrednosti- 00 govore da je u pitanju simetričan aeroprofil, jer je maksimalna relativna zakrivljenost $(c/l)_{max} = 0\%$ na rastojanju $(x/l)_{mc} = 0\%$ od napadne ivice. Takođe, naredne dve vrednosti- 12 daju informacije kao što je maksimalna relativna debljina $(d/l)_{max} = 12\%$ na standardnom rastojanju $(x/l)_{md} = 30\%$ od napadne ivice.

NACA 2415 (sl.7) je još jedan četvorocifreni aeroprofil koji nije simetričan i ne koristi se toliko često za vetroturbine. Njegova maksimalna relativna zakrivljenost iznosi $(c/l)_{max} = 2\%$ na rastojanju $(x/l)_{mc} = 40\%$ od napadne ivice, dok je vrednost maksimalne relativne debljine $(d/l)_{max} = 15\%$ na standardnom rastojanju $(x/l)_{md} = 30\%$ od napadne ivice.

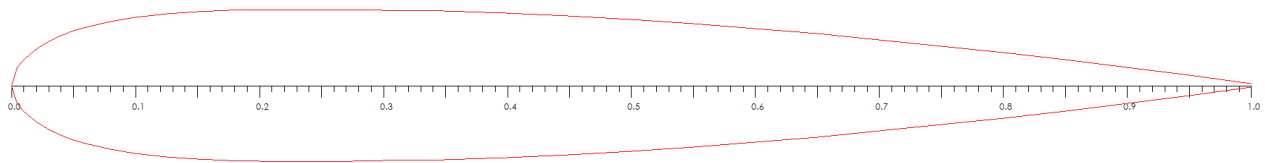
NACA 23012 (sl. 8) je petocifreni aeroprofil, često korišćen ne samo za krila aviona, već i za lopaticice glavnih rotora helikoptera, jer ima idealni (konstruktivni) koeficijent uzgona koji je skoro jednak praktičnom. To znači da aeroprofil stvara minimalni otpor. Relativna debljina iznosi $(d/l)_{max} = 15\%$ dok je $(x/l)_{mc} = 0.15$.



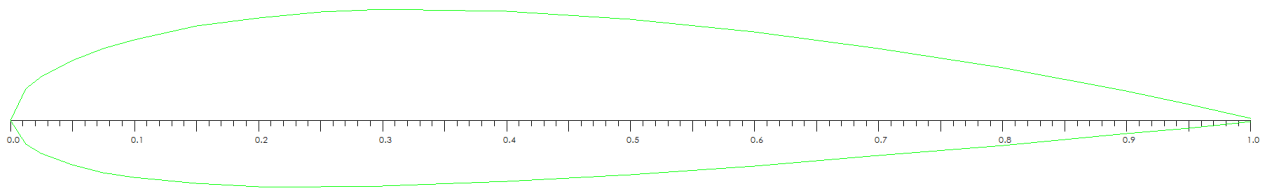
Slika 5. Osnovni konstruktivni parametri aeroprofila [15]

Za razliku od razmatranih aeroprofila, S809 (sl.9) ne pripada NACA grupi i ima maksimalnu relativnu debljinu 21% na rastojanju od 38% od napadne ivice. Dobijen je eksperimentalnim istraživanjem i najviše je u upotrebi za vetroturbine sa horizontalnom osom obrtanja [16].

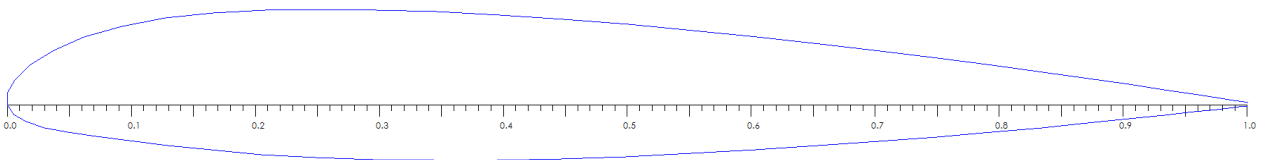
Kao i S809, DU 06-W-200 (sl.10) ne pripada NACA aeroprofilima, ali za razliku od njega koristi se kod vetroturbina sa vertikalnom osom obrtanja [17]. Maksimalna relativna debljina iznosi 20% na rastojanju od 31% od napadne ivice.



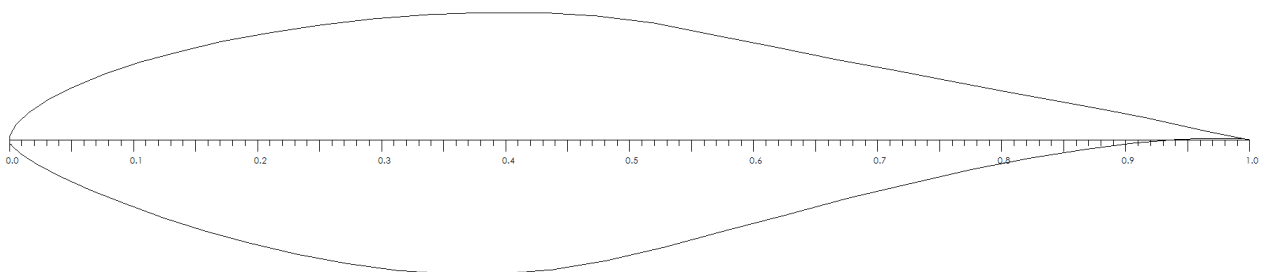
Slika 6. Aeroprofil NACA 0012



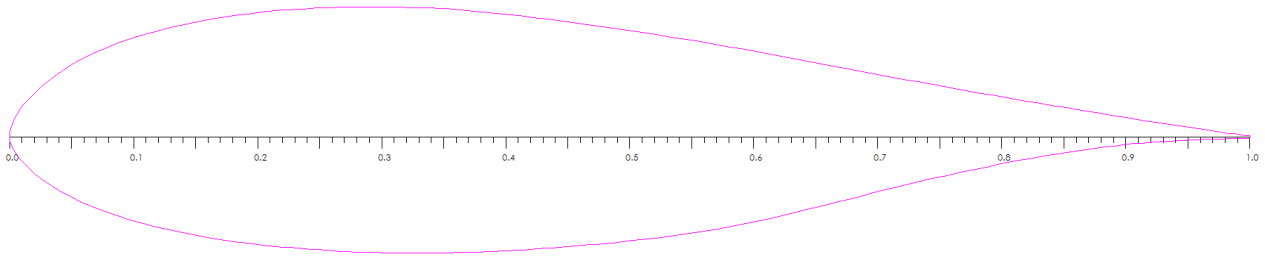
Slika 7. Aeroprofil NACA 2415



Slika 8. Aeroprofil NACA 23012

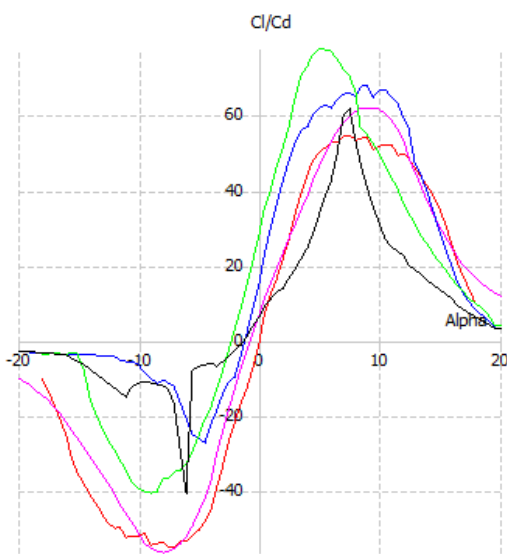


Slika 9. Aeroprofil S809

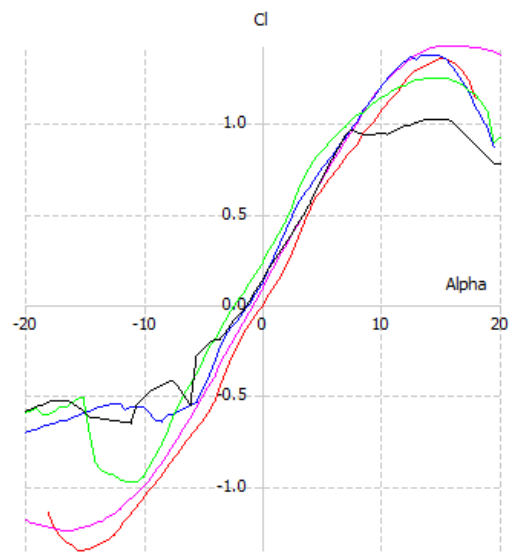


Slika 10. Aeroprofil DU-06-W-200

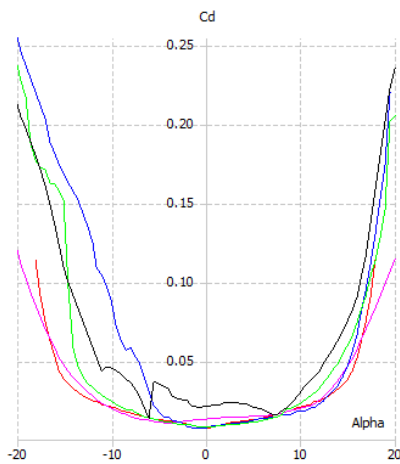
Finesa je karakteristika aeroprofila lopatice i predstavlja međusobni odnos koeficijenata aerodinamičkih sila uzgona i otpora (sl.11). To je broj koji pokazuje koliko puta je koeficijent sile uzgona (C_l) veći od koeficijenta sile otpora (C_d) pri odgovarajućem napadnom uglu. Povećanjem napadnog ugla povećava se i finesa sve dok ne dostigne maksimalnu vrednost, a pri daljem povećanju ugla ona se smanjuje. Na sl.12 i sl.13 su prikazane krive uzgona i otpora nastale pri ispitivanju odgovarajućih oblika aeroprofila u uslovima definisanim u tabeli 1.



Slika 11. Finesa aeroprofila

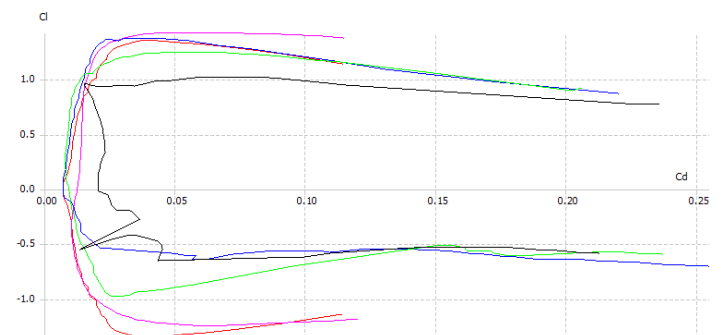


Slika 12. Kriva uzgona



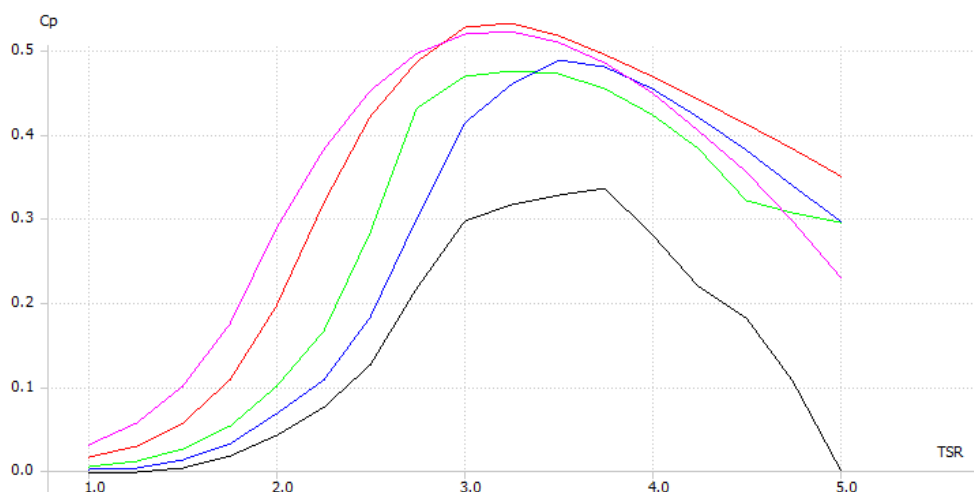
Slika 13. Kriva otpora

Polara (sl.14) predstavlja međusobni odnos koeficijenata aerodinamičkih sila uzgona i otpora.



Slika 14. Polara

Sa aspekta performansi, analizirana je promena koeficijenta snage (C_p) u funkciji koeficijenta rada (TSR) za sve razmatrane oblike aeroprofila i prikazana je na sl.15 i u tabeli 2.



Slika 15. Odnos koeficijenta snage i rada

Tabela 2. Prikaz maksimalnog koeficijenta snage sa različitim aeroprofilima

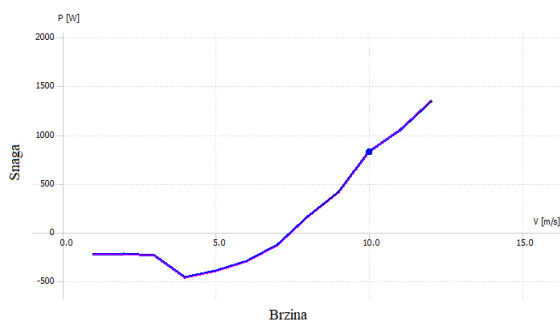
Aeroprofil	NACA 23012	NACA 2415	NACA 0012	S809	DU-06-W-200
Koeficijent rada - TSR	3.5	3.25	3.25	3.75	3.25
Maksimalni koeficijent snage - C_p	0.48	0.47	0.53	0.34	0.52

Iz tabele se može zaključiti da vetroturbine sa simetričnim aeroprofilom NACA 0012 , kao i DU-06-W-200 daju najbolje rezultate. Koeficijenti rada imaju prosečne vrednosti kao i kod ostalih aeroprofila i kreću se između 3 i 4, međutim maksimalni koeficijenti snage su znatno veći. To je veoma bitan parametar koji direktno utiče na snagu vetroturbine i koji ne sme da prelazi 0.593 [18]. Treba imati na umu da su ovo rezultati u idealnim uslovima i da bi u realnim ove vrednosti bile manje zbog poremećajnih faktora.

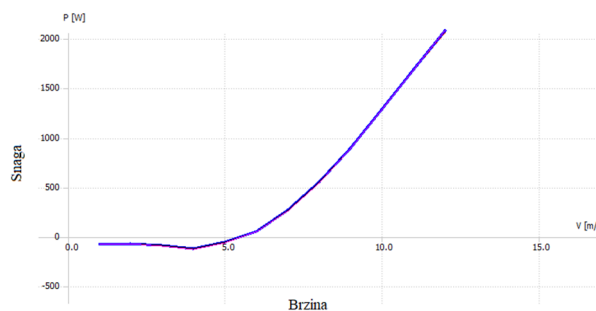
Dijagrami na sl. 16-20., predstavljaju promenu snage razmatranih turbina u funkciji brzine vetra, a u tabeli 3. navedene su njihove maksimalne snage pri razmatranoj brzini vetra od 10 m/s .

Tabela 3. Prikaz dobijene snage sa različitim aeroprofilima

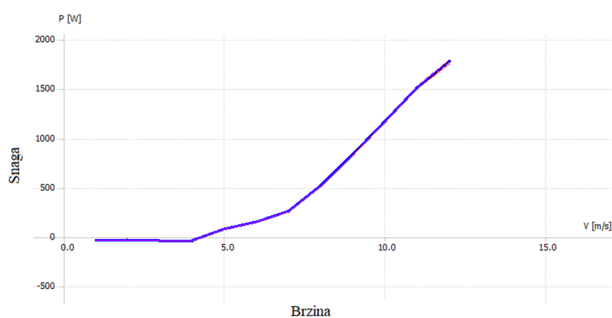
Aeroprofil	NACA 23012	NACA 2415	NACA 0012	S809	DU-06-W-200
Snaga [W]	1193	1162	1300	820	1280



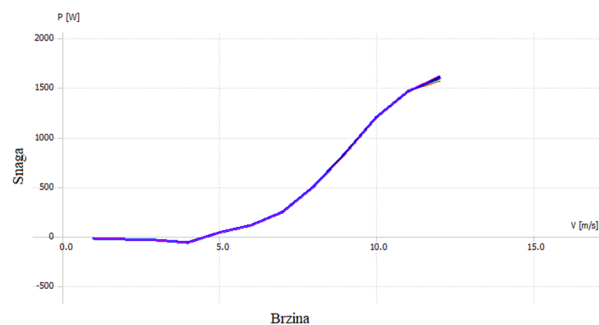
Slika 16. Odnos snage i brzine vetra za S809



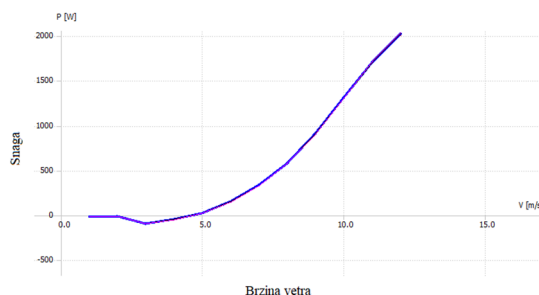
Slika 18. Odnos snage i brzine vetra za DU-06-W-200



Slika 17. Odnos snage i brzine vetra za NACA 2415



Slika 19. Odnos snage i brzine vetra za NACA 23012



Slika 20. Odnos snage i brzine vetra za NACA 0012

Na osnovu dijagrama i iz tabele 3. može se primetiti da je dobijena snaga kod razmatranih aeroprofila pri istim uslovima skoro identična sem kod aeroprofila S809, čime je i pokazano da on nije namenjen za ovaj tip vetroturbine. Uočena je razlika u minimalnoj brzini vetra koja je potrebna za samopokretanje turbine i ona se kreće u intervalu od $4 - 7 \text{ m/s}$. Ovo i dalje predstavlja njihovu glavnu manu zbog koje nemaju široku primenu u praksi.

3. ZAKLJUČAK

Vetroturbine sa vertikalnom osom obrtanja će i u narednom periodu predstavljati izazov za istraživače. Njihove performanse a i oblici aeroprofila nisu dovoljno istraženi i biće predmet daljih razmatranja. Najbolji aeroprofil koji su se pokazali, iz NACA serije su četvorocifreni i simetrični- 0012, kao i eksperimentalni aeroprofil DU-06-W-200. Ostali takođe daju prihvatljive ali ne i najbolje rezultate. U ovom trenutku mogućnosti primene ovih vetroturbina u gradovima su ograničene.

Energija koja se na ovaj način proizvodi može biti dovoljna za domaće potrebe bez uticaja na promene. Osim aerodinamike, važnu ulogu ima i struktura konstruktivnog i tehnološkog rešenja komponenata, kako ne bi došlo do havarije vetroturbina pri brzinama vetra iznad graničnih.

4. LITERATURA

- [1] Chinchilla, Guccione, Tillman, *Wind Power Technologies: A Need for Research and Development in Improving VAWT's Airfoil Characteristics*, Journal of Industrial Technology, vol. 27, No. 1, 2011.
- [2] M. Zhang, J. Zhang, Li, Yu, Qin, Wei, Song, *Multi-site measurement for energy application of small distributed wind farm in complex mountainous areas*, Energy Reports, 2020.
- [3] Da Rosa A.: *Fundamentals of Renewable Energy Processes*, Elsevier, New York, 2009.
- [4] Gipe P.: *Wind power: renewable energy for home, farm, and business*, White River Junction, 2004.
- [5] Hau E.: *Wind Turbines*, Springer, Berlin, 2006
- [6] Eriksson S., Bernhoff H., Leijon M.: Evaluation of different turbine concepts for wind power, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 12., pp. 1419-1434, 2008.
- [7] Zhipeng T., Yingxue Y., Liang Z., Bowen Y., *A review on the new structure of Savonius wind turbines*, *Advanced Materials Research*, pp. 467-478, 2013.
- [8] Barry M., Chapman R., *Distributed small-scale wind in New Zealand: Advantages, barriers and policy support instruments*, *Energy Policy*, 3358-3369, 2009.
- [9] Ragheb M., *Wind turbines in the urban environment*, 2008.

- [10] Marsh G., Peace S., Tilting at windmills: Utility-scale VAWTs: towards 10MW and beyond, Refocus, vol. 6, pp. 37-42, 2005.
- [11] Dominy R., Lunt P., Bickerdyke A., Dominy J., *Self-starting capability of a Darrieus turbine*, Sage journals, vol. 221., pp. 111-120, 2007.
- [12] Li S., Li Y., Yang C., Zhang X., Wang Q., Li D., Zhong W., Wang T., *Design and Testing of a LUT Airfoil for Straight-Bladed Vertical Axis Wind Turbines*, Applied Sciences, 2018.
- [13] Hand B., Kelly G., Cashman A., *Numerical simulation of a vertical axis wind turbine airfoil experiencing dynamic stall at high Reynolds number*, Computer & Fluids, 2017.
- [14] Li Q., Maeda T., Kamada Y., Mori N., *Investigation of wake characteristics of a Horizontal Axis Wind Turbine in vertical axis direction with field experiments*, Energy, vol. 141, pp. 262-272, 2017
- [15] Kostić I., *Primenjena aerodinamika*, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, 2016.
- [16] Somers D. , *Design and Experimental Results for the S809 Airfoil*, Springfield, 1997.
- [17] Castelli M., Simioni G., Benini E., *Numerical Analysis of the Influence of Airfoil Asymmetry on VAWT Performance*, International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering, vol. 6, No. 1, 2012.
- [18] Crnojevic C., *Mehanika fluida*, Univerzitet u Beogradu Mašinski fakultet, 2014.

Tanović D., Svorcan J., Peković O., Hasan M.S.

PERFORMANCE ANALYSIS OF WIND TURBINE WITH DIFFERENT AIRFOILS

Abstract

Growing concerns about global warming, pollution and price increases for fossil fuels have led to an interest in developing renewable and environmentally friendly energy sources. Therefore, research into renewables, especially wind energy is constantly expanding. In this paper was performed an aerodynamic analysis of a vertical axis wind turbine - VAWT, which has different airfoils. Two methods were used: BEM - Blade Element Momentum and DMS - Double Multiple Streamtube, usually adopted for early design and rating of turbines. The program used in this paper is QBlade. The obtained power results, depending on the wind speed, make it possible to compare the performance of the wind turbine.

Keywords: QBlade ,wind turbine ,airfoils, renewable energy sources