

VJETROTURBINA U MLAZNICI ZAKRETNE I FIKSNE IZVEDBE

Ivan Vrsalović¹, Bernard Franković², Igor Bonefačić²,

¹Tel. +385 51 621 487, E-mail: ivica.vrsalovic@ri.t-com.hr,

²Tehnički Fakultet, Sveučilište u Rijeci, Tel. +385 51 651 561,
E-mail: bernard.frankovic@riteh.hr, igor.bonefacic@riteh.hr

Sažetak: Na srednjem i južnom dijelu Jadrana većina potencijala vjetra dolazi od bure, juga i maestrata. Zbog toga vjetroturbine trebaju biti zakretne, da se može pretvoriti energija vjetra iz više smjerova. Međutim, na obalnom dijelu sjevernog Jadrana (od Zadra do Rijeke) dominantna je bura te preko 90% energetskog potencijala vjetra dolazi iz sjeveroistočnog kvadranta. Dakle, u tom području nema opravdanog razloga ugrađivati skupi ležaj i zakretni mehanizam, te vjetroturbina u mlaznici može biti izvedena fiksno, okrenuta uvijek prema buri. Procjenjuje se da bi vjetroturbine u mlaznici, fiksne izvedbe bile oko 20% jeftinije i pogonski sigurnije od zakretnih.

Izrazite efekte djelovanja bure u Senjskoj dragi možemo objasniti strujanjem hladne zračne mase koja ponire sa prijevoja Vratnik i ubrzava niz njegove padine. Sustav fiksnih vjetroturbina u reguliranoj mlaznici koji čini vjetroelektranu moguće je, u tom slučaju, izvesti u obliku vjetrobrane. Najpovoljnija veličina turbine u fiksnoj izvedbi bila bi promjera rotora $d=54$ m i snage $P_e = 1000$ kW. Na prostoru iznad Senja mogao bi se izgraditi niz od 3 vjetrobrane prosječne visine 150 m i ukupne dužine cca 15 km čineći sustav vjetrobrana ukupne snage $P_{e,s} = 360$ MW.

Ključne riječi: vjetroturbina, mlaznica, vjetroelektrana, vjetrobrana, Senjsko područje

1. UVOD

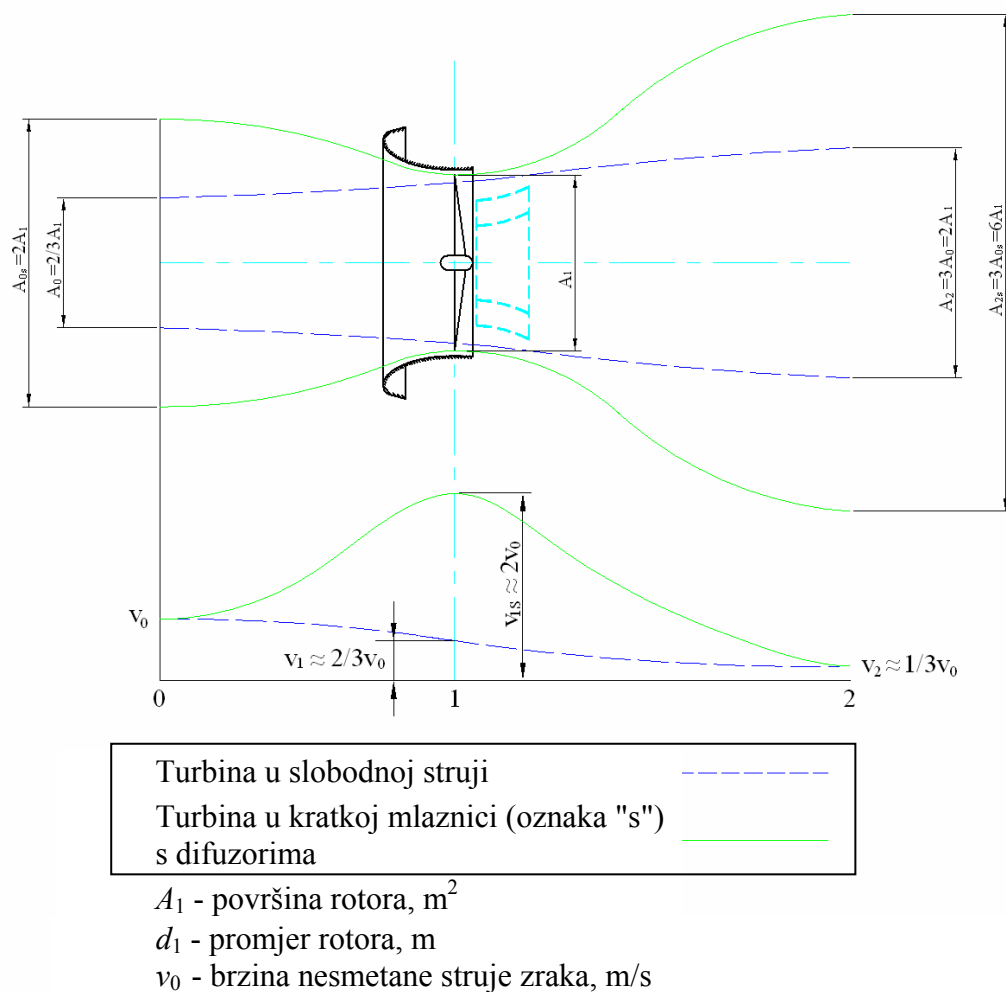
Prognoze govore da se jedna trećina električne energije do 2050. g., a 16,5 % do 2020. g. može proizvoditi iz energije vjetra, čime bi se smanjila emisija CO₂ za 113 milijarde tona.

U Svijetu je do danas ugrađeno 2 GW generatora koji koriste energiju vjetra, a postoje i prva postrojenja u Hrvatskoj. Te prve vjetroelektrane nisu rezultat razvoja domaće tehnologije, već je to rezultat stranih ulaganja i pogodnog tržišta za prodaju strane tehnologije. Razlozi tome su raznorazni, najčešće manjak sredstava za sustave obnovljivih izvora energije, manjak legislative kojom bi se regulirali odnosi u energetskom sektoru s ciljem poticanja korištenja obnovljivih izvora energije, a i manjak raspoložive domaće tehnologije.

2. VJETROTURBINA U REGULIRANOJ MLAZNICI

Naziv "Vjetroturbina u reguliranoj mlaznici", ukazuje na to, da se radi o novoj vjetroturbini koja u grlu mlaznice na lopaticama rotora koncentrira i regulira najpovoljniju količinu zraka čime se omogućuje korištenje slabih i srednjih vjetrova, čija je učestalost veća u odnosu na one jače.

Do povećanja brzine strujanja, a time i snage dolazi kada se vjetroturbina ugradi u kratku, profiliranu mlaznicu plašta (Slika 1.). Aerodinamički profiliran plašt inducira znatne promjene radijalne brzine u ravnini presjeka. Izveden je prstenasto kao prednji dio aeroprofila, kojemu je potlačna strana (grba profila) okrenuta prema središtu, tako da je uzgon na svakom mjestu usmjeren radijalno centripetalno, uslijed čega se javlja lokalno zbijena i usmjerena zračna struja koja nastrujava na rotor vjetroturbine. U strujnom toku se, zatim, javlja centrifugalno usmjerena reakcijska sila koja uz pomoć difuzora iza rotora izaziva jako proširenje strujnog polja, te smanjenje brzine.



Slika 1. Kratka aerodinamička mlaznica

Cirkulacija koja nastaje, stvara u strujnom polju dodatnu brzinu. Povišena brzina u ravnini rotora daje tada povećani protok zračne mase. Veća snaga na turbini potječe od povećane cirkulacije zračne mase koja u grlu mlaznice stvara povišenu brzinu:

$$P_e = K \cdot d^2 \cdot (v_s)^3 = K \cdot d^2 \cdot (2 \cdot v_0)^3 = 8 \cdot K \cdot d^2 \cdot v_0^3, \quad (1)$$

gdje je:

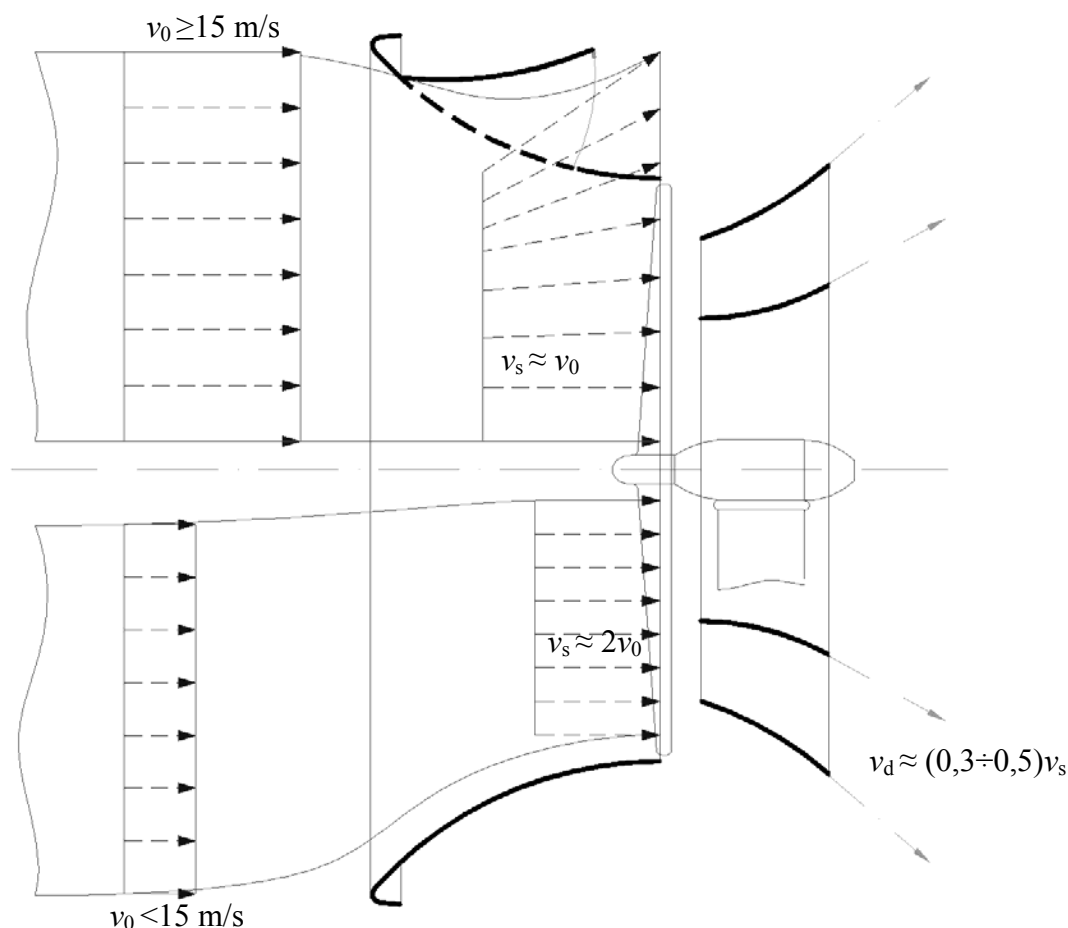
- d – promjer rotora turbine, odnosno grla mlaznice, m,
- K – konstanta, zavisna o gustoći zraka i efektivnoj iskoristivosti sustava, kg/m^3 ,

P_e – teoretska efektivna snaga vjetroturbine u mlaznici, kW,

v_0 – brzina nesmetane struje zraka, m/s,

v_s – brzina strujanja zraka u grlu mlaznice, m/s.

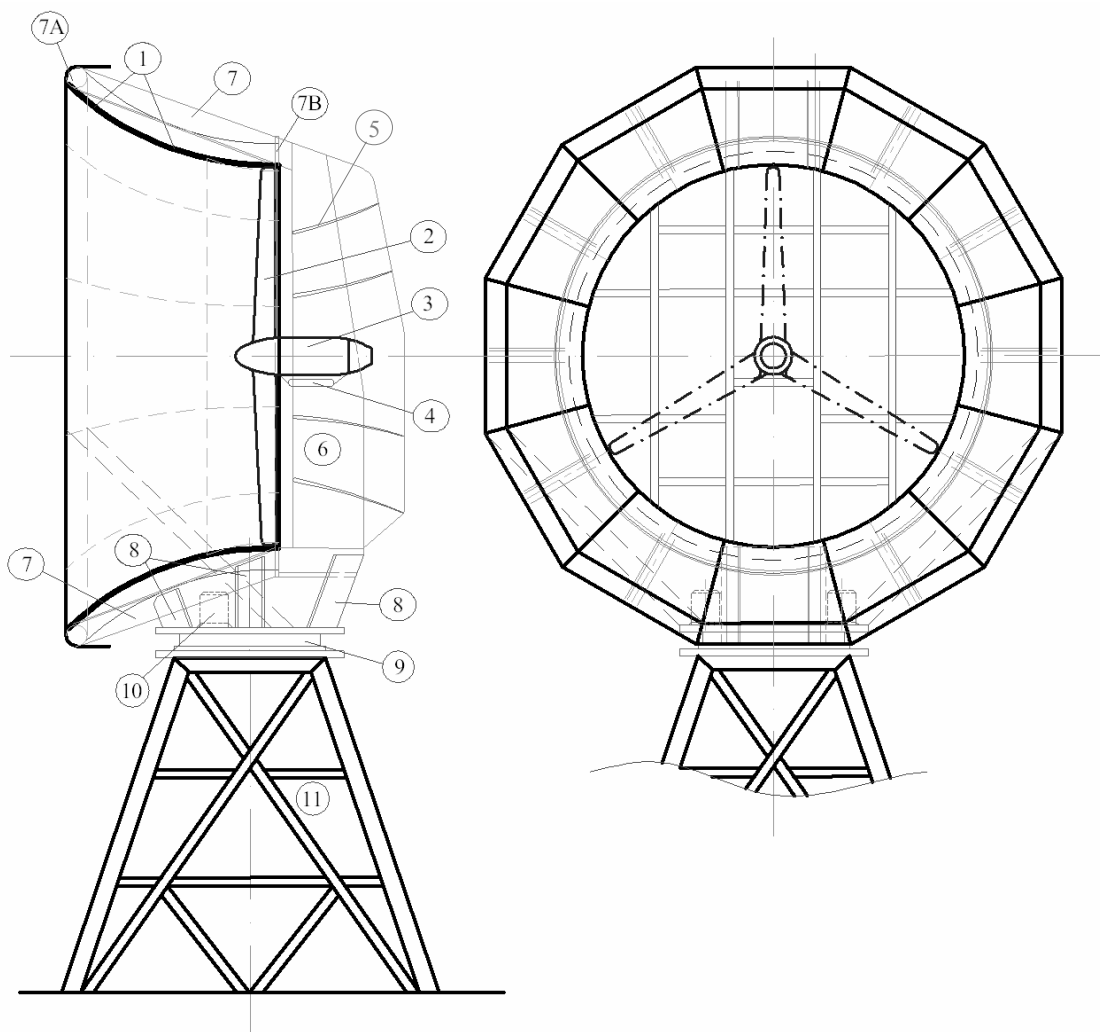
Za predmetnu analizu je, prema jednadžbi kontinuiteta, uzeto: $v_s = 2 \cdot v_0$.



Slika 2. Regulacija toka zračne struje u mlaznici

Radi regulacije brzine strujanja zračne mase u grlu sapnice, prilikom brzine vjetra iz okoliša veće od 15 m/s, prednji dio plašta ima programirane, automatske zakretne plohe, koje održavaju optimalnu brzinu strujanja (Slika 2.). Difuzorske lopatice služe za smanjenje izlazne brzine zračne struje, v_d , kako bi se povećao energetska učin vjetroturbine.

Konstrukcija nove vjetroturbine sastoji se od mlaznice, turbine ugrađene u njeno grlo, dodatnih difuzorskih ploha, odgovarajućeg regulacijskog sustava i nosećeg stupa pojačane izvedbe.



Slika 3. Vjetroturbina srednje ili velike snage s reguliranom mlaznicom

Osnovni dijelovi vjetroturbine srednje ili velike snage s regulirajućom mlaznicom su (Slika 3.):

1. Aerodinamički profilirane čvrste plohe mlaznice.
2. Rotor turbine,
3. Gondola generatora
4. Nosač gondole.
5. Difuzorske plohe-horizontalne.
6. Difuzorske plohe-vertikalne.
7. Sekundarni nosači (7A prednji poligonalni cijevni nosač, 7B stražnji prstenasti čelični obruč).
8. Glavni nosači.
9. Aksijalno-radijalni ležaj.
10. Zakretni mehanizam.
11. Rešetkasti nosač cjevaste izvedbe.

3. ZAKRETNE VJETROTURBINE U MLAZNICI

Osnovni elementi vjetroturbina u mlaznici za srednje i velike snage kod zakretne i fiksne izvedbe vrlo su slični.

Razlike nastaju kod nosećih stupova jer zakretne vjetroturbine trebaju imati još i skup, specijalni ležaj sa velikim zupčanicom te električni servomotor s malim zupčanicom. Ovaj je mehanizam potreban da se centralna osočina mlaznice i turbine zakrene kako bi se postavila točno u pravac djelovanja slabog vjetra, radi boljeg učinka.

Da se smanji brzina strujanja u grlu mlaznice kod jakog vjetra iz okoliša, ovaj mehanizam zakreće simetralu mlaznice od pravca vjetra radi smanjenja otvora mlaznice izloženog vjetru. Ovakav način regulacije porasta brzine strujanja u mlaznici moguć je uz dva osjetnika, brzine vjetra i smjera njegovog djelovanja, te uz pomoć računala, odnosno regulatora.

Zakretne vjetroturbine primaju energiju vjetra iz više smjerova, zato trebaju imati osiguran određeni slobodan prostor sa svih strana.

Uslijed velikog slobodnog prostora zakretne vjetroturbine (u mlaznici ili bez nje) imaju relativno nizak faktor energetske iskoristivosti zemljišta.

To je naročito nepovoljno u dolinama gdje je smjer jakog vjetra uvjetovan morfografijom terena.

4. FIKSNE TURBINE S MLAZNICOM I VJETROBRANE

U okolini Senja preko 90% energije vjetra dolazi iz sjeveroistočnog kvadranta. To je razlog ugradnje novih vjetroturbina u mlaznici fiksne izvedbe i to velike snage, premda se mogu instalirati i one srednje ili male snage.

Turbine u mlaznici fiksne izvedbe ugrađene u nizu imaju slijedeće prednosti:

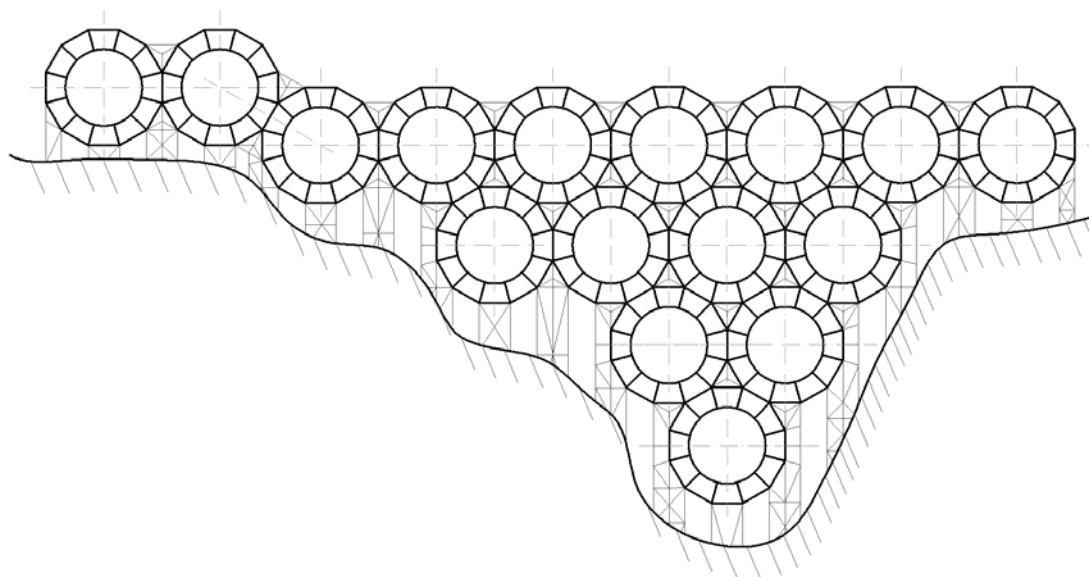
1. Pri ugradnji su jeftinije u odnosu na zakretne.
2. Jeftinije su za održavanje, a sigurnije u pogonu.
3. Iza fiksnih turbina sa mlaznicom u obliku vjetrobrane, nagli i snažni udari bure su ublaženi.
4. Višestruko povoljnije koriste zemljište, naročito doline bogate vjetrom.

Turbine u mlaznici fiksne izvedbe složene u niz jedna do druge tvore vjetrobranu. Ako teren dozvoljava, turbine se mogu postaviti jedna iznad druge u 2 ili više redova (Slika 4.).

Turbine u mlaznici fiksne izvedbe imaju regulaciju porasta brzine strujanja zakretom posebnih regulacionih ploha pomoću servomotora.

Da se poveća brzina strujanja na rotoru kod slabog vjetra, stlačeni zrak ($5 \div 8$ bar) pomoću radnog cilindra zatvara regulacione plohe mlaznice.

Za jakog vjetra, kada se ispusti stlačeni zrak, povratna opruga otvara regulacione plohe prema programu regulatora zavisno od jačine vjetra a porast brzine strujanja u mlaznici se smanjuje.



Slika 4. Vjetroelektrana u brani

U vrijeme kada vjetroturbina nije u pogonu povratna opruga opet djeluje (otvara plohe) da strujanje bude slobodno, bez koncentracije unutar mlaznice.

U zaleđu Senja u 3 niza, prosječne visine vjetrobrane 150 m, ukupne dužine 15 km, moglo bi se ugraditi 24 vjetroturbine u mlaznici (promjera $d = 54$ m, snage $P_e = 1$ MW) po svakom kilometru, odnosno ukupno 360 ili sveukupno instalirane efektivne snage $P_{e,s} = 360$ MW.

Prva vjetrobrana bila bi ugrađena na udaljenosti 3,3 km od grada, a ostale na međusobnoj udaljenosti od 1,0 km do 1,5 km.

Kod projektiranja, te izgradnje ovog potpunog novog, velikog i značajnog energetskog objekta bit će potrebno angažirati veći broj vrhunskih stručnjaka iz područja energetike, arhitekture i ekologije kako bi se polupropusna vjetrobrana što bolje uklopila u okolinu.

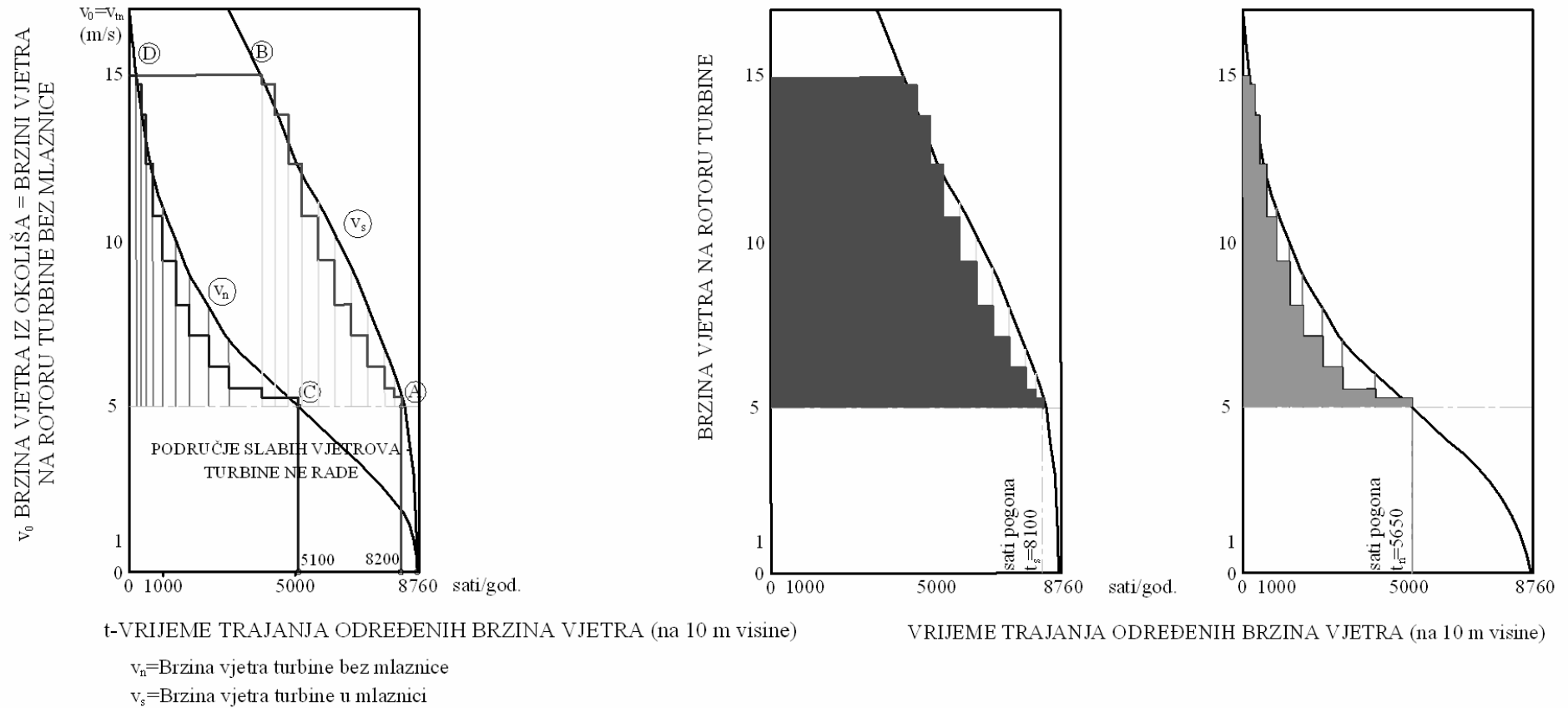
5. ENERGETSKI I EKONOMSKI EFEKTI VJETROTURBINE U MLAZNICI

Za ilustraciju izvanrednih pogonskih mogućnosti odabrana je nova zakretna vjetroturbina u mlaznici snage 750 kW, koja bi se ugradila na otok Lastovo. Prema trajanju pojedinih brzina iz dijagrama, te pomoću snaga za te brzine, izračunata je godišnja proizvodnja elektroenergije turbine u mlaznici. Na sličan način proračunata je godišnja proizvodnja iste takve normalne turbine (bez mlaznice) u slobodnoj struji vjetra.

Rezultati tih proračuna dani su u Tablici 2. te u dijagramu na Slici 5.

Lokacija: Otok Lastovo

Osnovni dijagram $v_0=f(t)$
izrađen je prema [9].



Slika 5. Krivulje prosječnog godišnjeg trajanja brzina vjeta na 10 m visine

Napomene :

- Proračuni, tablica i dijagram izrađeni su prema brzinama vjetra mjerenim na visini od 10 m, što je za ovu komparativnu analizu zadovoljavajuće.
- Uz korekciju brzine vjetra (s porastom visine) izračunat je godišnji čisti prihod prema prikazanoj metodi [10] koji bi za novu vjetroturbinu u mlaznici iznosio solidnih $G_{ps} = 210.535$ USD, a samo $G_{pn} = 12.852$ USD za vjetroturbinu bez mlaznice.
- Prosječni jedinični troškovi proizvodnje nove vjetroturbine u mlaznici (snage 750 kW), iznose 0,02462 USD za 1 kWh, odnosno manje od 2,5 US centa [11].
- U proračunu je odabrana brzina u grlu mlaznice 2 puta veća od one iz okoliša, t.j. $v_s = 2v_0$. Ovako veliki porast brzine u mlaznici rezultirati će izvanrednim povećanjem proizvodnje elektroenergije.

Ako bi se odabrao manji porast brzine od $v_s = 2v_0$, tada bi to povećanje bilo nešto niže ali bi vjetroturbina bila jeftinija. Da li ići na manje ili veće brzine strujanja u mlaznici zavisi od više faktora: karakteristike vjetra te načina regulacije porasta brzine u mlaznici kao i veličine investicije.

6. ZAKLJUČAK

Aerodinamički profiliran (kratki) plašt može osigurati veći protok zračne mase kroz grlo mlaznice i povisiti brzinu strujanja na rotoru nove turbine što uzrokuje znatan porast snage. Specijalne regulacione plohe na plaštu mlaznice omogućuju dvostruku regulaciju i veliku pogonsku stabilnost novih vjetroturbina. Prema rezultatima proračuna za otok Lastovo (Tablica 2.) vidi se da bi nova vjetroturbina u mlaznici snage 750 kW radila godišnje oko 3100 efektivnih sati dulje od vjetroturbine bez mlaznice. Uslijed toga, proizvodnja elektroenergije nove vjetroturbine u mlaznici tokom godine bila bi veća za 4,3 puta nego proizvodnja iste takve vjetroturbine bez mlaznice.

Nešto modificirane vjetroturbine u mlaznici moguće je ugrađivati u nizovima čime one djeluju kao vjetroelektrane-vjetrobane. Kao pogodna lokacija za izgradnju takve instalacije predložena je okolica Senja gdje većina vjetropotencijala dolazi od bure tj. iz sjeveroistočnog kvadranta.

LITERATURA

- [1] Annual report of Global Wind Energy Council 2005, 2006.
- [2] Phillips, D.G., Richards, P.J., Flay, R.G.J.: *Diffuser Development For A Diffuser Augmented Wind Turbine Using Computational Fluid Dynamics*, Department of Mechanical Engineering, The University of Auckland, New Zealand, 2005.
- [3] Phillips, D.G., Flay, R.G.J., Nash, T.A., *Aerodynamic Analysis and Monitoring of the Vortec 7 Diffuser Augmented Wind Turbine*, IPENZ Trans., Auckland, New Zealand, November 1999.
- [4] Molly, P.J. : *Windenergie in Theorie und Praxis*, Karlsruhe, 1978., BMFT(Hrg.): Nutzung der Windenergie, Frankfurt am Main, 1976.
- [5] Johnson, G.L. : *Wind energy systems*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1985.
- [6] Vrsalović, I. : *"Senj" wind power plant*, Solar and wind technology, No. 2/3, Oxford, 1990.
- [7] Vrsalović, I. : Patent P-802-86 i ostali.

- [8] Franković, B., Vrsalović, I.: *New high profitable wind turbines*, Renewable energy 24, 2001.
- [9] Poje, D., Cividini, B.: *Wind persistence in the Adriatic*, Sunčeva energija 9, 69-72., 1988.
- [10] Matić, M., *Isplativost izgradnje vjetroelektrana u području Senja*, EGE 6, 99-99, 1994.
- [11] Vrsalović, I., Franković, B., Bonefačić, I., Lenić, K.: *Novi model vjetroturbine u sapnici*, Energija i okoliš, Vol. II, Opatija, 2002., 265-272.
- [12] Vrsalović, I., Franković, B., Bonefačić, I., Wolf, I.: *Zaštitno-energetske vjetroturbine u sapnici*, Energija i okoliš, Vol. II, Opatija, 2004., 27-32.

WIND TURBINE IN THE NOZZLE OF FIXED AND STEERABLE DESIGN

Abstract: *On Central and Southern Adriatic coast greatest wind potential comes from Bora, Scirocco and Mistral. That's the main reason why wind turbines have to be equipped with yaw drive. On the other hand, on Northern Adriatic coast (from Zadar to Rijeka) Bora is dominant wind so that over 90% of wind energy potential comes from northeastern quadrant. So there is no reason to built in expensive bearings and yaw drive and wind turbine in the nozzle can be fixed and directed toward northeast. Such wind turbine should be about 20% cheaper and more reliable than steerable version.*

Effect of Bora in Senj region can be compared with cold air mass flow plunging down the slopes of Vratnik and accelerating in process.

Fixed wind turbines can be mounted in horizontal and vertical arrays. On suitable terrain it can even be constructed in multiple arrays which, in that case, act as a wind dam.

Rotor diameter of $d = 54$ m and power of $P_e = 1000$ kW would be the optimal size of fixed wind turbine. Three arrays of wind turbines in the nozzle with average height of the wind dam of 150 m and total length of about 15 km could be installed in region above Senj having total power of $P_{e,s} = 360$ MW.

Key words: wind turbine, nozzle, wind power station , wind dam, Senj district area