



ODREĐIVANJE MODIFIKOVANOG PROFILA BRZINE POMOĆU PRORAČUNA OPSTRUJAVANJA I VEŠTAČKIH NEURONSKIH MREŽA²⁾

Rezime

Efikasno iskorišćenje energije vetra (kao jednog od najzastupljenijih obnovljivih izvora energije) je danas veoma aktuelna tema. Mnogo se radi na poboljšanju aerodinamičkih performansi vetroturbin u urbanim sredinama gde je raspoloživi prostor ograničen i postoji mnogo okolnih objekata koji mogu lokalno da unaprede ili unazade nadolazeći profil brzine. Iz tog razloga, često se postavljaju pomoćne geometrije (koncentratori) koje treba da usmere ili povećaju brzinu kroz rotor. Rad prikazuje olakšano određivanje takvog modifikovanog (ubrzanog) profila brzine pomoću sprege numeričkih simulacija opstrujavanja koncentratora i veštačkih neuronskih mreža. Geometrija koncentratora je parametrizovana da bi se postiglo najveće moguće ubrzanje za uslove na određenoj lokaciji.

Ključne reči: koncentrator, povećanje brzine, proračunska aerodinamika, veštačke neuronske mreže

1. UVOD

Kao odgovor na sve veće energetske potrebe, broj instalisanih vetroturbin širom sveta stalno se povećava. Internacionalna agencija za obnovljive izvore energije (International Renewable Energy Agency, IRENA) beleži da je 2018. godine dostignut ukupni energetski prinos vetrogeneratora od približno 564 GW [1]. Tako je efikasno iskorišćenje energije vetra, kao jednog od najzastupljenijih obnovljivih izvora energije (OIE), danas veoma aktuelna tema. Veliki stimulan istraživanjima u ovoj oblasti pruža i najnovija prepravka direktive Evropske unije o upotrebi OIE gde je jedan od postavljenih ciljeva dostizanje 32% potrošnje energije u EU iz OIE do 2030. godine [2].

Male vetroturbinе, kako sa horizontalnom tako i sa vertikalnom osom obrtanja, postavljene u urbanim i gusto naseljenim sredinama takođe mogu doprineti ovom cilju. Iako se do nedavno smatralo da je snaga generisana na ovaj način nedovoljna i neisplativa jer vetroturbinе rade u Zemljinom graničnom sloju gde je brzina mala i promenljiva, a mogu se javiti i vrtlozi odvojeni od okolnih zgrada/objekata, sve je više stručnih radova koji se bave problematikom što većeg iskorišćenja energije vetra u oblastima velike površinske hrapavosti kao što su gradska jezgra, predgrađa, šume, nacionalni parkovi, poljoprivredno zemljište, itd. [3-5]. Unapređenje strujnog polja moguće je ostvariti lokalno, u neposrednoj blizini rotora vetroturbinе, dodavanjem određenih kanala ili uvodnika/slivnika, kao što je probano u [6-9].

Tema predstavljenog istraživanja je što tačnija procena mogućih doprinosa (pre svega brzini kroz rotor, a posledično i generisanoj mehaničkoj snazi vetroturbinе) postavljanja elipsoidnog koncentratora u različite nadolazeće profile brzine vetra, što je najpre ostvareno ravanskim numeričkim simulacijama strujnog polja oko koncentratora, a potom znatno olakšano i ubrzano uvođenjem veštačkih neuronskih mreža (VNM) [10] kao pogodnog predikcionog alata. U tu svrhu, geometrijski oblik koncentratora i nadolazeći profil brzine vetra parametrizovani su pomoću pet ulaznih promenljivih, dok se vektor izlaznih veličina dimenzije 2 sastoji iz procenjene vrednosti srednje V_{sr} i maksimalne brzine V_{max} po najužem, središnjem poprečnom preseku koncentratora.

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

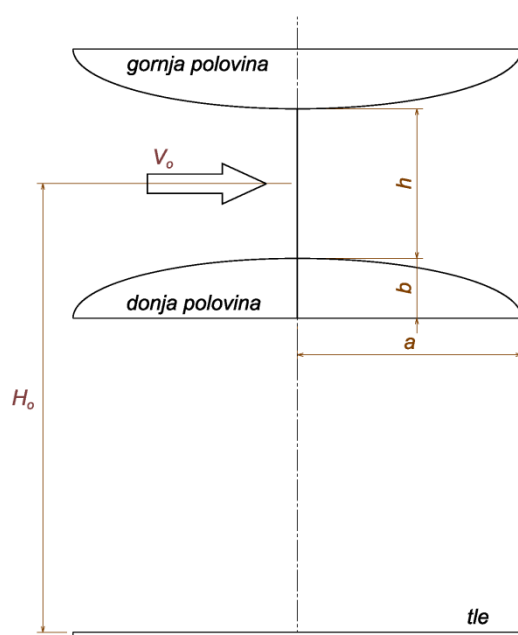
²⁾ U okviru ovog rada saopštavaju se rezultati istraživanja po Ugovoru 451-03-68/2020-14/200105 koji finansijski podržava Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije

2. GEOMETRIJSKI MODEL KONCENTRATORA

Model koncentrataora sastoji se iz dva jednaka, saosno postavljena dela, poluelipsoida, koji su određeni vrednostima svojih poluosa, veće a i manje b . Rastojanje između dve polovine označeno je promenljivom h i odgovara prečniku vetroturbine sa horizontalnom osom obrtanja ili visini vetroturbine sa vertikalnom osom obrtanja. Visinska koordinata središta vetroturbine (tačke centralno postavljene između dva poluelipsoida) odgovara referentnoj visini $H_0 = 3$ m na kojoj je neporemećena brzina vetra jednaka V_0 . Profil brzine u Zemljinom atmosferskom graničnom sloju aproksimiran je stepenim zakonom:

$$v(H) = v_0 \left(\frac{H}{H_0} \right)^\alpha, \quad (1)$$

gde eksponent α predstavlja hrapavost površine. Ovde su razmatrane tri različite vrednosti eksponenta $\alpha = [0.1807, 0.2126, 0.2308]$, klase hrapavosti 3, koje redom odgovaraju terenu sa drvećem i žbunjem, predgrađu i gradskom jezgru. Pobrojani ulazni parametri $[a, b, h, V_0, \alpha]$ kao i položaj koncentrataora određen referentnom visinom H_0 skicirani su na slici 1.

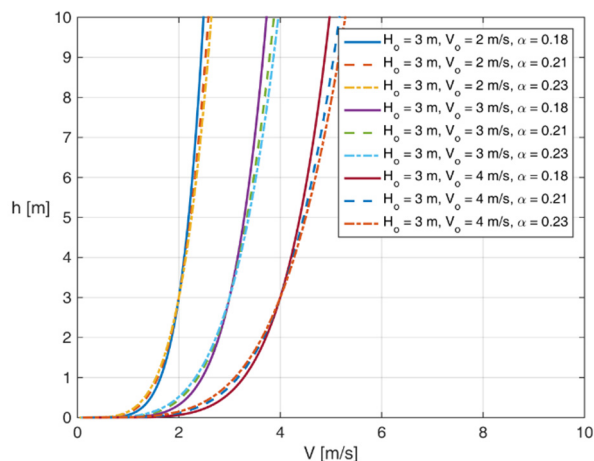


Slika 1. Prikaz ulaznih parametara i položaj geometrije u prostoru

Tabela 1 prikazuje moguće vrednosti i jedinice pet ulaznih parametara kao i veličinu prostora ulaznih promenljivih. Kako je koncentratore planiran za primenu na malim vetroturbinama maksimalne vrednosti veće i manje poluose su 2 m i 1 m, redom. Slično, prečnik ili visina vetroturbine ograničena je na 1.5 m. Takođe, referentnoj brzini vetra pridodeljene su male vrednosti (brzina V_0 razmatrana je u približnom opsegu 2-4 m/s) što opet treba da odgovara realnim, svakodnevnim uslovima strujanja u urbanim sredinama.

Tabela 1. Prostor ulaznih promenljivih			
Promenljiva	Jedinica	Moguće vrednosti	Dimenzija skupa
a	[m]	[1.0, 1.5, 2.0]	3
b	[m]	[0.4, 0.7, 1.0]	3
h	[m]	[0.5, 1.0, 1.5]	3
V_0	[m/s]	[2, ..., 4]	6
α	[-]	[0.1807, 0.2126, 0.2308]	3

U prvoj iteraciji, izvedeno je ukupno 486 različitih simulacija opstrujavanja, što je dobijeno razmatranjem 27 različitih geometrija koncentrataora pri 18 različitih nadolazećih profila brzine od kojih su neki skicirani na slici 2.



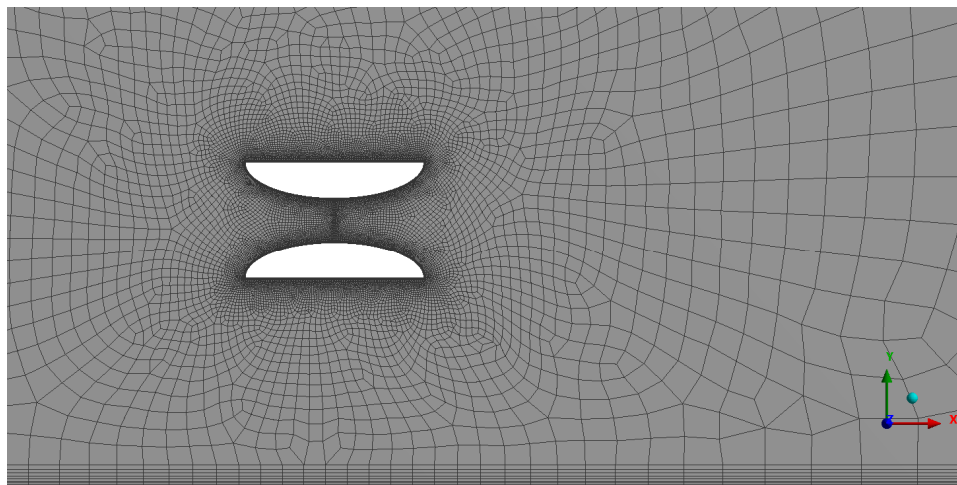
Slika 2. Deo razmatranih nadolazećih profila brzine pri referentnoj visini $H_o = 3$ m

3. PRORAČUNI OPSTRUJAVANJA KONCENTRATORA

Ravanski proračuni opstrujavanja koncentratora sprovedeni su u komercijalnom softverskom paketu ANSYS posebno namenjenom inženjerskim proračunima.

Okolni pravougaoni proračunski domen prostire se -25 m ispred i 50 m iza ose koncentratora, a visine je 25 m. Dve polovine koncentratora isečene su iz proračunskog domena. Definisane granice domena su: ulazna, izlazna, tle i zidovi koncentratora.

Generisane proračunske mreže su hibridne nestruktuirane, srednje finoće i sadrže približno 25-30 hiljada ćelija, primer prikazan na slici 3. Definisane su funkcije veličine po i granični sloj (izduženih prizmatičnih ćelija) u neposrednoj blizini zidova koncentratora i tla.



Slika 3. Detalj proračunske mreže oko koncentratora struje vazduha

Proračun opstrujavanja sproveden je numeričkim rešavanjem jednačina održanja mase, količine kretanja i dopunskih jednačina transporta turbulentnih veličina metodom konačnih zapremina u softverskom paketu ANSYS FLUENT.

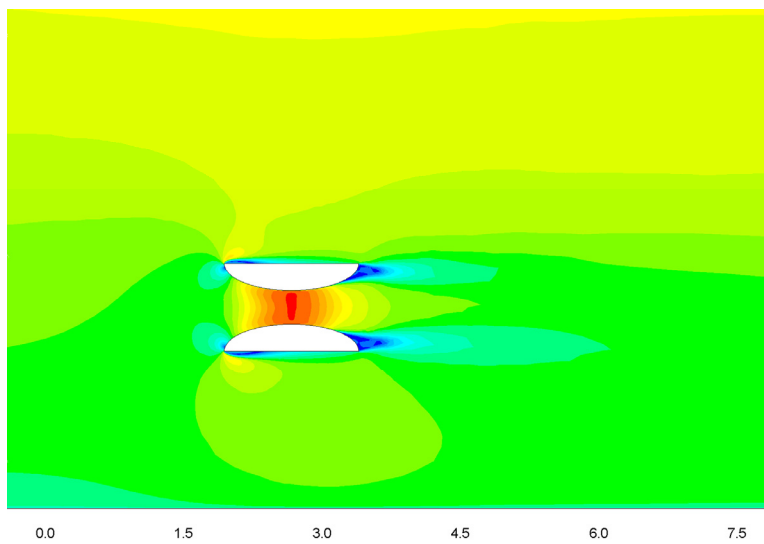
Strujanje je pretpostavljeno kao ravansko, stacionarno, nestišljivo i viskozno. Za zatvaranje Navije-Stoksovih jednačina osrednjenih Rejnoldsovom statistikom korišćen je dvojednačinski $k-\omega$ SST turbulentni model, veoma zastupljen u vazduhoplovnim primenama.

Po ulaznoj granici definisane su vrednosti intenziteta brzine $V(H)$ i turbulentnih veličina $k(H)$ i $\omega(H)$ neporemećenog strujnog polja u funkciji visine H . Po izlaznoj granici pretpostavljena je nulta vrednost natpritiska.

Kako je strujanje nestišljivo korišćen je segregatni solver. Za sprezanje polja pritiska i brzine upotrebljena je SIMPLEX šema, dok su prostorni gradijenti aproksimirani šemama 2. reda tačnosti.

Proračuni su vršeni do postizanja konvergiranih vrednosti srednje V_{sr} i maksimalne brzine V_{max} po središnjem preseku za šta je bilo dovoljno 2000 iteracija.

Primer proračunatog strujnog polja prikazan je na slici 4.



Slika 4. Proračunate konture brzine oko koncentratora pri $V_o = 4 \text{ m/s}$ na $H_o = 3 \text{ m}$

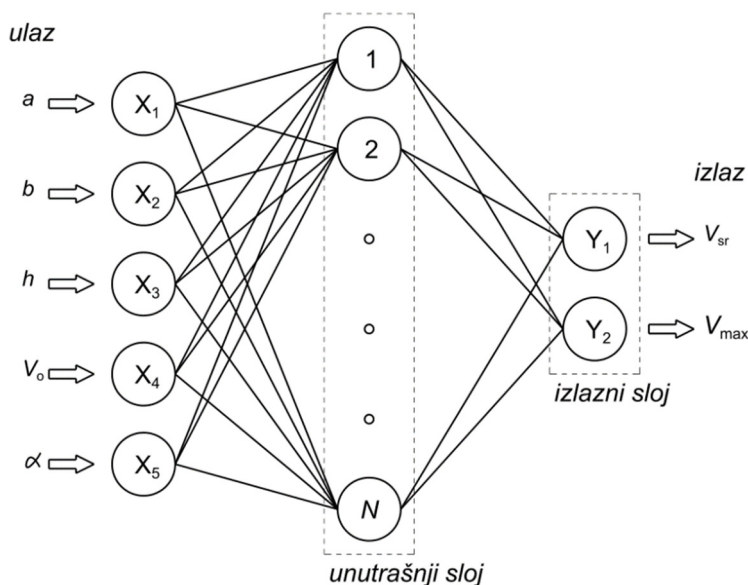
4. VEŠTAČKE NEURONSKE MREŽE

VNM su pogodan alat za procenu ponašanja složenih, nelinearnih sistema [10]. Uprošćeni prikaz arhitekture korišćenih VNM prikazan je na slici 5. Sve testirane veštačke neuronske mreže su nepovratne dvoslojne (1 skriveni i izlazni sloj) pri čemu je menjan broj neurona, $N = [5, 10, 15, 20]$, u unutrašnjem, skrivenom sloju. Tip treniranja je nadgledan. Ovakve VNM su robusne i pogodne za široki opseg primena. Ovde su upotrebljene za bržu procenu strujnog polja nego što se dobija rešavanjem Navije-Stoksovih jednačina.

Za aktivacionu funkciju odabran je tangens hiperbolički:

$$f(x) = \tanh x = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}, \quad (2)$$

zbog svojih pogodnih osobina: neprekidnosti, glatkoće, monotonosti, ograničenosti na opseg $(-1, 1)$ i diferencijabilnosti.



Slika 5. Ilustracija arhitektura korišćenih VNM

Generalno, veći broj neurona u unutrašnjem slujju VNM čini fleksibilnijom, ali može voditi i do

"prezasićenja", odnosno prevelikog prilagođavanja skupu za treniranje (dok je greška procene novog skupa u suštini prevelika) iz kog razloga se mreža proverava na skupu za validaciju. Ovde je 70% početnog skupa (od 486 kombinacija) upotrebljeno za treniranje mreže, dok je po preostalih 15% iskorišćeno za validaciju i testiranje koje se sprovodi na kraju procesa učenja zarad procene konačnih performansi i kvaliteta VNM.

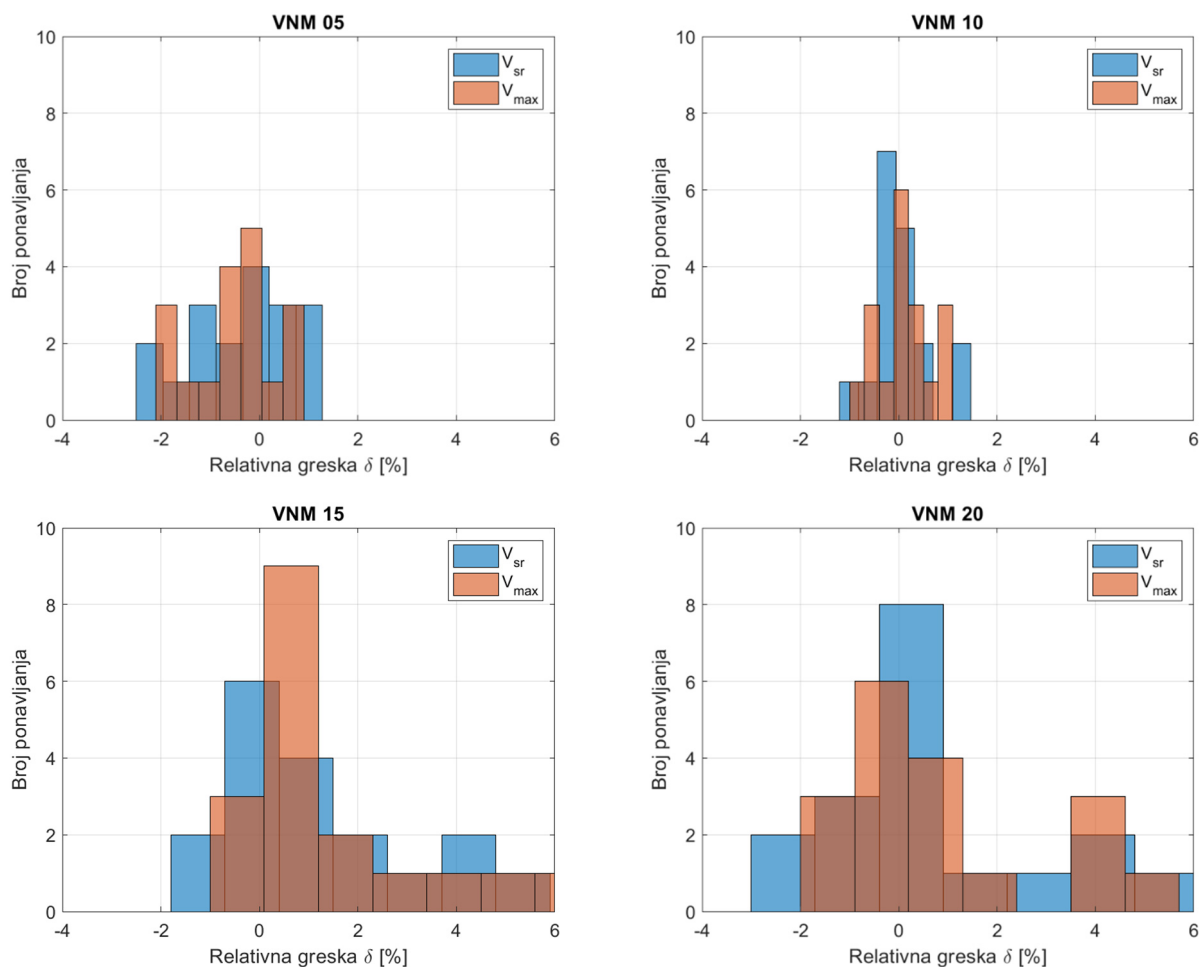
5. REZULTATI I DISKUSIJA

Karakteristike i kvalitet VNM moguće je oceniti poređenjem generalnih parametara: ukupnim brojem iteracija učenja n , brzinom učenja η , standardnom devijacijom σ i srednjom vrednošću kvadrata greške (mean squared error) mse . Tabela 2 prikazuje dobijene vrednosti globalnih pokazatelja kvaliteta testiranih VNM. Mreže sa 5, 10, 15 i 20 neurona u unutrašnjem sloju označene su kao VNM 05, VNM 10, VNM 15 i VNM 20, redom.

Pokazatelj	VNM 05	VNM 10	VNM 15	VNM 20
n	41	47	36	66
η	0.00010	0.00001	0.00001	0.00001
σ	0.06	0.04	0.03	0.03
mse	0.00222	0.00045	0.00114	0.00105

Primetno je da dalje dodavanje neurona i povećanje unutrašnjeg sloja neće značajno doprineti boljoj proceni parametara strujnog polja i da mreža sa 10 neurona pruža zadovoljavajuće rezultate. Sa druge strane, proširenjem polaznog skupa verovatno je moguće unekoliko poboljšati performanse VNM.

Formirane VNM dodatno su testirane nad novim skupom od 18 različitih kombinacija geometrija koncentratora i profila brzina. Slika 6 prikazuje histograme relativne greške procene srednje i maksimalne brzine po središnjem preseku koncentratora.



Slika 6. Raspodela greške procene srednje i maksimalne brzine pomoću VNM nad novim skupom

Na kraju, zanimljivo je spomenuti i koje je to očekivano povećanje brzine između dve polovine koncentratora u odnosu na neporemećeno strujno polje. Različitim geometrijama koncentratora srednju brzinu moguće je ubrzati 30-110% (najverovatnije povećanje je oko 60-70%), što bi se odrazilo na posledično povećanje snage između dva i devet puta (najverovatnije je četverostruko).

6. ZAKLJUČAK

Prikazana brza i efikasna metodologija procene očekivanog profila brzine pruža uvid u moguće doprinose koncentratora aerodinamičkim performansama male vetroturbine postavljene u urbanoj sredini. Izuzetno je pogodna za preliminarne faze projektovanja vetroturbine, procenu radnih uslova na lokaciji, različite optimizacione studije i sl.

Rad demonstrira mogućnost primene veštačkih neuronskih mreža u rešavanju realnog inženjerskog problema iz oblasti iskorišćenja energije vetra. Na osnovu relativno malog skupa numeričkih rezultata (proračunato je samo 486 različitih slučajeva opstrujavanja), a za nemali broj raznorodnih ulaznih parametara (ovde 5), razvijen je robusan alat za brzu, zadovoljavajuće tačnu procenu lokalnog povećanja brzine vetra koja nadolazi na rotor. Takođe je pokazano da pravilno definisana geometrija koncentratora može dovesti do višestrukog povećanja generisane snage vetroturbine.

10. LITERATURA

- [1] IRENA: *Renewable capacity statistics 2019*. International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi, 2019.
- [2] L 328: *Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources*.
- [3] Arteaga-Lopez, E., Angeles-Camacho, C., Banuelos-Ruedas, F.: *Advanced methodology for feasibility studies on building-mounted wind turbines installation in urban environment: Applying CFD analysis*, Energy, Vol. 167, pp. 181-188, 2019.
- [4] Stathopoulos, T., Alrawashdeh, H., Al-Quraan, A., Blocken, B., Dilimulati, A., Paraschivoiu, M., Pilay, P.: *Urban wind energy: Some views on potential and challenges*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 179, pp. 146-157, 2018.
- [5] Ishugah, T.F., Li, Z., Wang, R.Z., Kiplagat, J.K.: *Advances in wind energy resource exploitation in urban environment: A review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 37, pp. 613-626, 2014.
- [6] Alom, N., Saha, U.K.: *Four Decades of Research Into the Augmentation Techniques of Savonius Wind Turbine Rotor*, Journal of Energy Resources Technology, Vol. 140, e050801, 2018.
- [7] Alizadeh, H., Jahangir, M.H., Ghasempour, R.: *CFD-based improvement of Savonius type hydrokinetic turbine using optimized barrier at the low-speed flows*, Ocean Engineering, Vol. 202, e107178, 2020.
- [8] de Santoli, L., Albo, A., Garcia, D.A., Bruschi, D., Cumo, F.: *A preliminary energy and environmental assessment of a micro wind turbine prototype in natural protected areas*, Sustainable Energy Technologies and Assessments, Vol. 8, pp. 42-56, 2014.
- [9] Wong, K.H., Chong, W.T., Sukiman, N.L., Poh, S.C., Shiah, Y.-C., Wang, C.-T.: *Performance enhancements on vertical axis wind turbines using flow augmentation systems: A review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 73, pp. 904-921, 2017.
- [10] Hagan, M.T., Demuth, H.B., Beale, M.H.: *Neural Network Design*. PWS Publishing, Boston, 1996.

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

ASSESSMENT OF THE MODIFIED VELOCITY PROFILE THROUGH FLOW SIMULATIONS AND ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

Abstract: Efficient wind energy extraction presents a very attractive contemporary research topic. A lot is being done on the improvement of aerodynamic performances of wind turbines in urban environments where available space is limited and there are numerous surrounding objects that can locally improve or deteriorate the oncoming velocity profile. Thus, it is possible to install a flow concentrator whose main purpose is to direct and augment velocity through the rotor. The paper describes a simplified estimation of the modified velocity profile by coupling fluid flow simulations with artificial neural networks. Concentrator geometry is parameterized in order to achieve the greatest possible flow acceleration at a particular location.

Key words: flow concentrator, speed augmentation, computational aerodynamics, artificial neural networks