

# Optimizacija koncentratora vazduha vetroturbina sa vertikalnom osom obrtanja

## Optimization of flow concentrator for vertical-axis wind turbines

Ognjen Peković\*, Jelena Svorcan\*, Aleksandar Simonović\*, Toni Ivanov\*, Dragoljub Tanović\*

\* Katedra za vazduhoplovstvo, Univerzitet u Beogradu – Mašinski fakultet

**Apstrakt-** Neki od osnovnih problema savremenog društva su klimatske promene, globalno zagrevanje, zagađenje i sl. Većom eksploatacijom obnovljivih izvora energije, a naročito energije vetra, moguće je donekle smanjiti negativne efekte povećanja energetske potreba. Jedan od mogućih načina boljeg iskorišćenja resursa vetra je postavljanje povećanog broja vetroturbina u urbane sredine. Međutim, kako one tada funkcionišu u nepovoljnim radnim uslovima (neravnomernoj i promenljivoj brzini, Zemljinom graničnom sloju, vrtložnom tragu okolnih objekata), potrebno je paralelno razvijati elemente kojima je moguće lokalno povećati brzinu neporemećenog, nadolazećeg strujnog polja. U tu svrhu, moguće je instalirati koncentrator vazduha, posebno projektovan za vetroturbine sa vertikalnom osom obrtanja.

Predloženi koncentrator je koničnog oblika. Njegove geometrijske karakteristike moguće je dodatno optimizovati u zavisnosti od same vetroturbine ali i uslova na lokaciji na koju se postavlja. Odluku ga jednostavnost i operabilnost u svim pravcima duvanja vetra.

Rad opisuje izvršene ravanske numeričke simulacije strujnog polja oko koncentratora vazduha sa ciljem definisanja njegovog optimalnog oblika, a u zavisnosti od zadatog prečnika i visine vetroturbine kao i nominalne vrednosti neporemećene brzine vetra. Proračuni su izvršeni metodom konačnih zapremina uz pretpostavke nestišljivog, viskoznog fluida. Rezultati su dati u obliku raspodela brzine kao i brojnih vizuelizacija strujnog polja. Optimizacija nekoliko osnovnih geometrijskih karakteristika koncentratora izvršena je na osnovu proračunatih aerodinamičkih performansi kao i ravnomernosti rezultujućih profila brzine.

**Ključne reči-** Koncentrator vazduha, Numerička simulacija opstrujavanja, Obnovljivi izvori energije, Optimizacija, Vetroturbina sa vertikalnom osom obrtanja

**Abstract-** Some of the fundamental problems of modern society include climate change, global warming, pollution etc. By increasing the exploitation of renewable energy resources, and wind energy in particular, it is possible to, at least to some extent, reduce the negative effects of the constant increase in energy needs. One way to make better use of wind energy resources is the installment of an increased number of small-scale wind turbines in urban areas. However, given that then they function in unfavorable operating conditions (uneven and changeable wind speeds, Earth's boundary layer, vortex trail of surrounding objects), it is at the same time necessary to develop additional elements that can locally augment the speed of the oncoming flow. Bearing this in mind, it is possible to install a wind concentrator, specially designed for vertical-axis wind turbines.

The proposed concentrator is of conic shape. Its geometric characteristics can be additionally optimized with respect to the wind turbine as well as the conditions at the planned location. It is characterized by simplicity and omnidirectional operability.

The paper describes the performed 2D numerical simulations of the flow field surrounding the concentrator in order to define its optimal geometric shape with respect to the chosen wind turbine diameter and height as well as the nominal value of the undisturbed wind speed. Computations were conducted by finite volume method assuming incompressible, viscous fluid. Obtained results are presented in the form of velocity distributions as well as numerous fluid flow visualizations. Optimization of several basic geometric characteristics of the concentrator is executed on the basis of the computed aerodynamic performances and uniformity of the resulting velocity profiles.

**Index Terms-** Concentrator, Flow simulator, Renewable energy resources, Optimization, Vertical-axis wind turbine

### I. UVOD

Klimatske promene trenutno predstavljaju najveći globalni izazov. Redukcija emisije “gasova staklene bašte” u

atmosferu ima najveći potencijal za umanjenje globalnog zagrevanja usled čega je prelazak na obnovljive izvore energije (OIE) postao jedan od glavnih načina borbe protiv klimatskih promena, te je tako u najnovijoj prepravki direktive Evropske

uni je o upotrebi OIE postavljen cilj da do 2030. godine 32% potrošnje energije u EU bude iz OIE [1].

Urbane vetroturbine značajno mogu doprineti ovom cilju, kako kroz generisanje energije tako i kroz podizanja svesti građana o njihovoj važnosti [2,3]. Vetroturbine sa vertikalnom osom obrtanja (VOO) pokazale su se kao najperspektivniji koncept za postavljanje u urbanim sredinama usled manje osetljivosti na česte promene brzine i pravca vetra (omnidirekcionalnost) i povećanu turbulenciju usled interakcije vetra sa okolnim građevinama [4]. Osnovna mana ovog tipa vetroturbina je njihova manja efikasnost kao i velika brzina uključivanja odnosno nemogućnost da rade u uslovima kada je brzina vetra ispod 5 m/s.

U stručnoj literaturi može se naći veliki broj radova koji se bave problemima korišćenja vetroturbina u urbanim uslovima. Grubo, moguće je podeliti istraživanja u dva pravca: određivanje optimalnog položaja montaže vetroturbine zavisno od lokalne ruže vetra i orijentacije građevina u blizini [5,6] i pronalaženje načina za lokalno uvećanje resursa vetra putem kanalisanja rotora [7], i/ili dodavanja različitih lopatica i aerodinamičkih uvodnika/slivnika [8].

U ovom radu analiziran je inovativan koncept koničnog koncentratora za vetroturbine sa VOO, kojim se nastoji lokalno povećati brzina vetra u zoni rotora, a samim tim i povećati snaga vetroturbine i vremenski interval u kojem vetroturbina može proizvoditi električnu energiju. Oblik koncentratora je parametrizovan i razmatran je uticaj različitih geometrijskih parametara za usvojenu referentnu vetroturbinu sa VOO, tipa H-rotora sa tri lopatice, prečnika  $D = 1.5$  m, i visine  $H = 1.5$  m, kako što je prikazano na slici 1.



Slika 1. Model vetroturbine sa VOO i koncentrorom

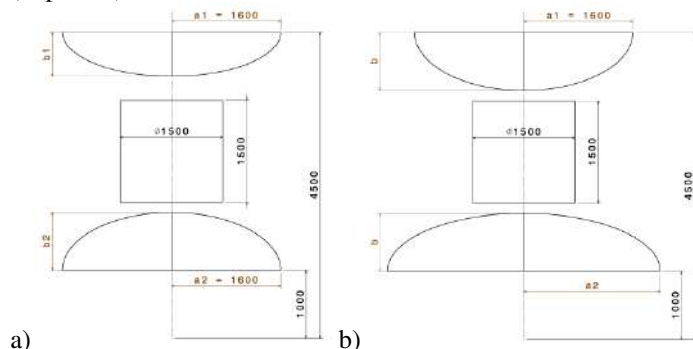
## II. OPIS PARAMETRIZOVANIH MODELA

Zarad sticanja boljeg uvida u značaj i efekte pojedinačnih geometrijskih parametara koncentratora, razmatrana su dva različita geometrijska modela, dok su određene dimenzije pretpostavljene kao konstantne. Naime, i donji i gornji deo koncentratora pretpostavljeni su kao elipsoidi, od kojih je svaki određen svojim središtem i vrednostima poluosa: veće  $a$  i manje  $b$  (u opštem slučaju razlikujemo 4 ulazna parametra  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_1$  i  $b_2$ ). Središta elipsoida fiksirana su na osi obrtanja vetroturbine na visinama 1 m i 4.5 m, redom za donju i gornju polovinu. Planirano je vetroturbina bude centralno postavljena između ove dve tačke.

U prvom slučaju veće poluose oba elipsoida su jednake,  $a_1 = a_2 = 1.6$  m, dok su promenljivi parametri čija se optimizacija i vrši dve manje poluose  $b_1$  i  $b_2$  koje uzimaju vrednosti iz opsega [0.5 m, 1.0 m], slika 2a.

U drugom slučaju fiksirana je samo veća poluosa gornje polovine  $a_1 = 1.6$  m, ali je pretpostavljeno da su manje poluose oba dela jednake  $b = b_1 = b_2$ , tako da se opet vrši optimizacija dva ulazna parametra,  $1.6 \text{ m} \leq a_2 \leq 2.1 \text{ m}$  i  $0.5 \text{ m} \leq b \leq 1.0 \text{ m}$ , slika 2b.

Kriterijumi po kojima se vrši optimizacija izvedeni su iz ravanskog proračuna opstrujavanja koncentratora i uglavnom se odnose na profil brzine po visini između dva dela koncentratora (elipsoida).



Slika 2. Ilustracija geometrijskih parametara koncentratora: a) u prvom slučaju, b) u drugom slučaju (mereno u [mm])

## III. PRORAČUNSKI POSTUPAK

Kako je tema ovog rada iterativni optimizacioni postupak geometrijskog oblika koncentratora vetroturbine (sproveden u komercijalnom softverskom paketu ANSYS posebno namenjenom inženjerskim proračunima) koji podrazumeva veliki broj ponavljanja nekoliko grupa komandi koje se odnose na različite proračunske podsisteme, u nastavku je dat njihov kratak pregled.

### A. Pravljenje geometrijskih modela

Pravljenje različitih geometrijskih modela realizovano je u ANSYS DesignModeler-u. Zarad jednostavnosti proračuna, svi razmatrani modeli su ravanski (2D). Koraci definisanja jedne geometrije su:

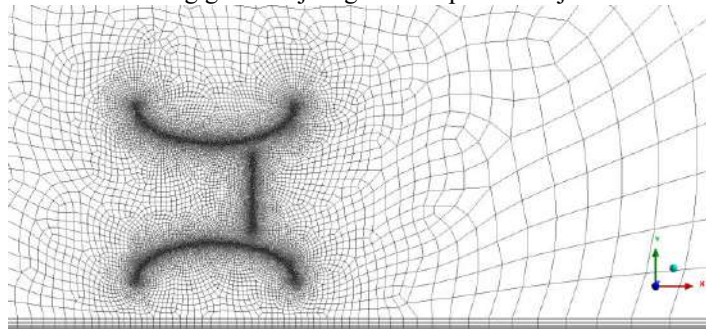
- 1) u  $xy$ -ravni definisan je okolni pravougaoni domen (pomoću naredbe *Surfaces from Sketches*) dimenzija: dužine 75 m (25 m ispred ose vetroturbine, 50 m nizstrujno) i visine 25 m,
- 2) druga skica u  $xy$ -ravni odnosi se na konične preseke (dve polovine elipsa – gornje i donje), gde su parametri svake elipse poluose  $a$  i  $b$  (npr.  $a = 1.6$  m,  $b = 0.75$  m što je usvojeno kao polazna, referentna geometrija), dok im je položaj u prostoru fiksiran po visini ( $h = 1.0$  m i 4.5 m); naročito je značajan presek  $p_2$  (linija dužine  $H = 1.5$  m iza ose rotacije na udaljenosti  $D/2 = 0.75$  m) koji odgovara zadnjem položaju lopatica na njihovoj kružnoj putanji,
- 3) linije koncentratora i karakterističnog preseka  $p_2$  projektovane su na površ – fluid (naredba *Projection*) da bi bilo moguće proglasiti ih posebnim unutrašnjim granicama,
- 4) definisane su granice i delovi proračunskog domena: ulaz – *inlet*, izlaz – *outlet*, tle – *wall\_ground*, gornji deo koncentratora – *wall\_1*, donji deo koncentratora – *wall\_2*, presek  $p_2$  (unutrašnja granica),
- 5) na kraju, zanemarena su linijska tela (opcija *Suppress Line Body*) jer nisu značajna za dalji proračun.

### B. Proračunske mreže

Sve proračunske mreže neophodne za proračune opstrujavanja koncentrataora pravljenе su u ANSYS Meshing-u. Opet, radi uspešnog ponavljanja algoritma generisanja mreže za različite kombinacije vrednosti ulaznih parametara, iskorišćeno je nekoliko dostupnih naredbi:

- 1) pre svega, svaka proračunska mreža je globalno usitnjena (globalni parametar koji određuje finoću je  $Relevance = 100$ , upotrebљene su dodatne funkcije za definisanje veličine elemenata po zakrivljenim i kratkim linijama – *Advanced Size functions On: Proximity and Curvature, Relevance Center* je postavljen na *Medium* radi dobijanja lokalno finije mreže),
- 2) definisana veličina ćelija po delovima koncentrataora i po preseku  $p_2$  je 10 mm,
- 3) definisan je granični sloj u blizini tla (debljina prvog sloja  $y_1 = 10$  mm, faktor rasta ćelija  $q = 1.2$ , broj slojeva pravougaonih ćelija  $N = 10$ ).

Formirane proračunske mreže broje ukupno između 24000 i 28000 ćelija (veličina malo varira sa promenom geometrijskih parametara). Ova finoća/gustina usvojena je kao zadovoljavajuća nakon studije konvergencije mreže kada je ostvarena nezavisnost izlaznih parametara od broja konačnih zapreminica. Proračunska mreža referentnog geometrijskog modela prikazana je na slici 3.



Slika 3. Primer proračunske mreže oko referentnog modela ( $a_1 = a_2 = 1.6$  m i  $b_1 = b_2 = 0.75$  m)

### C. Numerička postavka

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

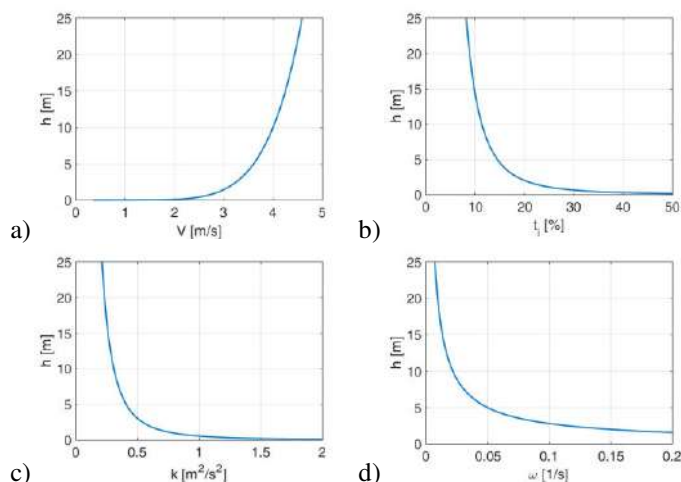
Strujanje je pretpostavljeno kao ravansko, stacionarno, nestišljivo i viskozno. Za zatvaranje Navije-Stoksovih jednačina osrednjenih Rejnoldsovom statistikom korišćen je dvojednačinski  $k-\omega$  SST turbulentni model (veoma zastupljen u vazduhoplovnim primenama).

Po ulaznoj granici definisane su vrednosti intenziteta brzine  $V_0$  i turbulentnih veličina  $k$  i  $\omega$  neporemećenog strujnog polja. Svi profili su promenljivi po visini, čime je simulirano strujanje u Zemljinom graničnom sloju, slika 4.

Kako pokretanje vetroturbine može biti problematično, namerno je razmatran moguć doprinos koncentrataora pri malim vrednostima brzine vetra  $V_0$  što odgovara urbanim sredinama i/ili prljavim/hrapavim terenima. Ovako usvojen profil brzine znači da je nadolazeća brzina na visini središta vetroturbine oko 3.3 m/s.

Po izlaznoj granici pretpostavljena je nulta vrednost natpritisaka. Kako je strujanje nestišljivo korišćen je segregatni solver. Za sprežanje polja pritiska i brzine upotrebljena je najjednostavnija SIMPLE šema, dok su prostorni gradijenti aproksimirani šemama 2. reda tačnosti.

Proračuni su vršeni do postizanja konvergiranih vrednosti minimalne  $V_{min}$ , srednje  $V_{sr}$  i maksimalne brzine  $V_{max}$  po karakterističnom preseku  $p_2$  (koji odgovara nizstrujnom položaju lopatica), za šta je uglavnom bilo potrebno i dovoljno između 2000 i 3000 iteracija.



Slika 4. Profili: a) brzine  $V_0$  [m/s], b) intenziteta turbulencije  $t_1$  [%], c) kinetičke energije turbulencije  $k$  [ $m^2/s^2$ ] i d) specifične disipacije kinetičke energije turbulencije  $\omega$  [1/s] definisani po ulaznoj granici

## IV. OPTIMIZACIJA

Kao optimizacioni metod izabrana je pravolinijska pretraga diskretnog prostora promenljivih (*grid search method*). Kako je u oba slučaja broj ulaznih promenljivih bio 2, vrednosti ciljnih funkcija su prosto određene u svakoj tački/uređenom paru 2D prostora promenljivih. Glavna mana ovog, inače jednostavnog, metoda je potreban broj kombinacija za veći broj ulaznih parametara. Međutim, usvojeni broj od dva ulazna parametra u ovom radu nije problematičan.

Načelno (u slučaju jednokriterijumske optimizacije), optimalno rešenje odgovara uređenom paru koji vraća ekstremnu vrednost ciljne funkcije. Međutim, kako je ovde sprovedena dvokriterijumska optimizacija u odnosu na dve ciljne funkcije: vrednost srednje brzine (željeno što veće) i odnosa minimalne i maksimalne brzine po preseku  $p_2$  (željena vrednost što bliže 1) čime se kvantifikuje uniformnost profila brzine, formirani su Pareto skupovi koje sačinjavaju "jednako dobra" rešenja. Konačni odabir optimalnog rešenja vršen je na osnovu rezultujućih Pareto frontova (tačke najbliže gornjem desnom uglu jer se traže maksimumi obe funkcije).

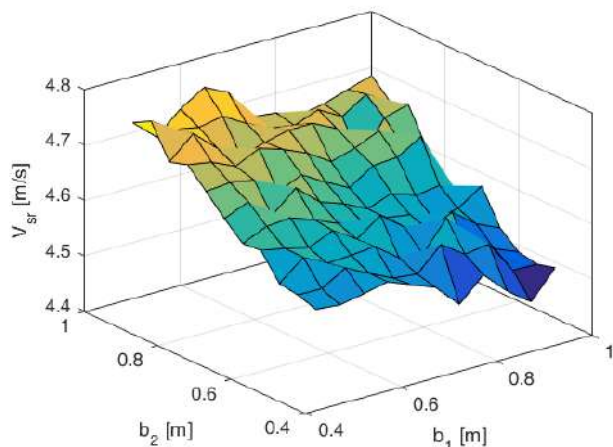
## V. REZULTATI I DISKUSIJA

Rezultati proračuna oba geometrijska modela prikazani su grafički i numerički u nastavku.

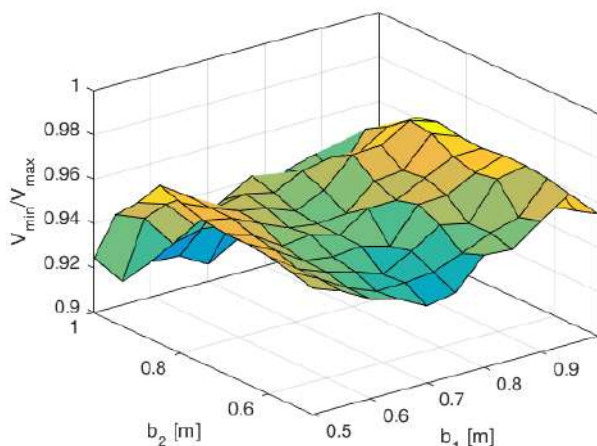


### A. Prvi slučaj – promenljive manje poluose $b_1$ i $b_2$

Proračunate vrednosti razmatranih ciljnih funkcija prikazane su na slici 5. Dok se maksimalna vrednost srednje brzine  $\max(V_{sr})$  ostvaruje za što veće  $b_2$  i što manje  $b_1$ , relacija uniformnosti profila brzine nije tako pravolinijska (maksimalne vrednosti od približno 0.98 ostvarene su za kombinacije srednjih vrednosti  $b_2$  i ekstremnih vrednosti  $b_1$ , kako minimalnih tako i maksimalnih).

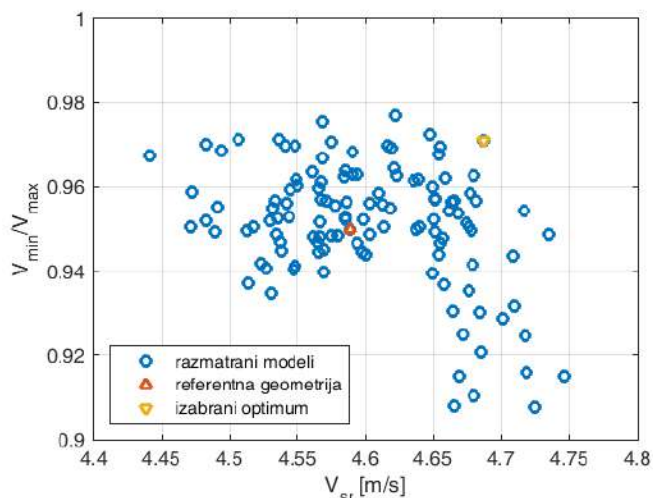


a)



b)

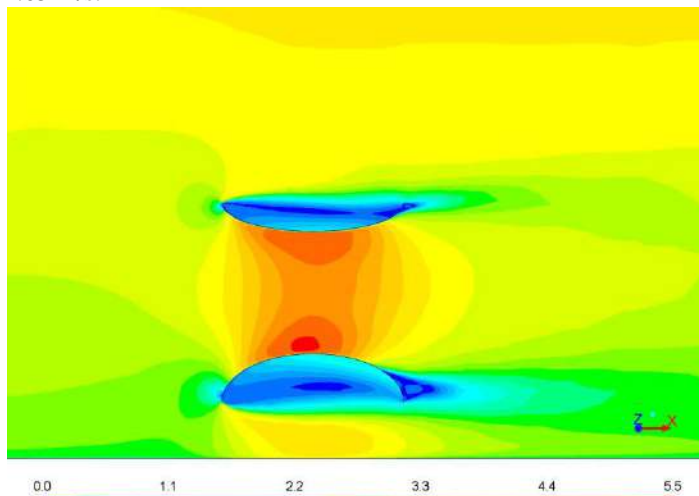
Slika 5. a) Srednja brzina  $V_{sr}$ , b) odnos minimalne i maksimalne brzine  $V_{min}/V_{max}$  za različite kombinacije vrednosti manjih poluosa  $b_1$  i  $b_2$



Slika 6. Dobijeni Pareto front u prvom slučaju

Formirani Pareto front (gde su na  $x$ - i  $y$ -osu unesene vrednosti ciljnih funkcija, a željeno optimalno rešenje u ovom slučaju treba da teži maksimumima obe funkcije) uz vrednosti dobijene za referentnu geometriju koncentratora i naznačeni izabrani optimum ( $b_1 = 0.5$  m,  $b_2 = 0.85$  m) ilustrovani su na slici 6.

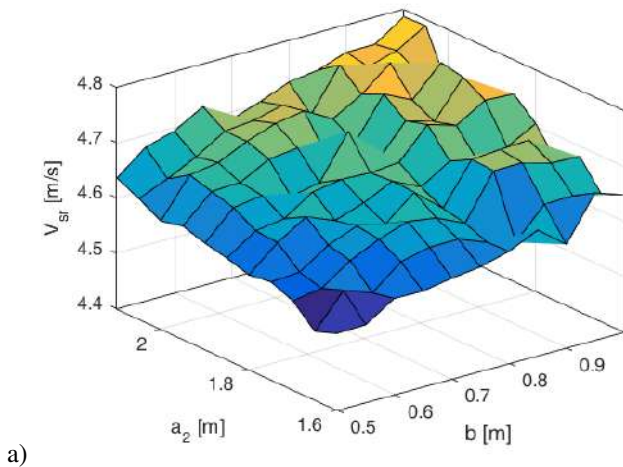
Proračunate polje brzine oko izabranog optimalnog rešenja skicirano je na slici 7. Vidljivo je lokalno ubrzanje između gornjeg i donjeg dela koncentratora i to sa približno 3.3 m/s na 4.65 m/s.



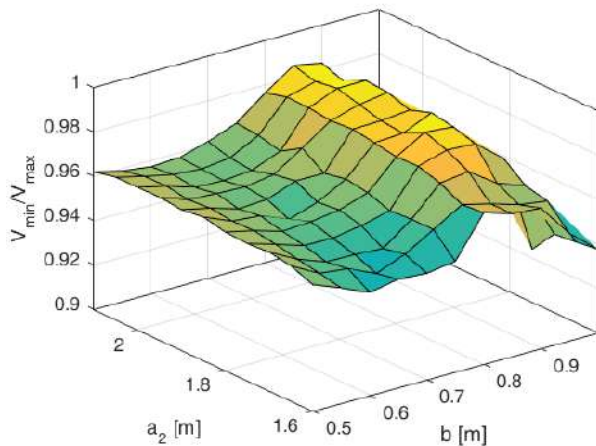
Slika 7. Konture brzine oko optimalnog koncentratora u prvom slučaju

### B. Drugi slučaj – promenljive veća poluosa $a_2$ i manje poluosa $b = b_1 = b_2$

Opet, proračunate vrednosti razmatranih ciljnih funkcija prikazane su na slici 8. Generalno, srednja brzina  $V_{sr}$  raste sa povećanjem vrednosti nezavisnih promenljivih  $a_2$  i  $b$ , dok se najveća uniformnost profila brzine ostvaruje pri  $0.8 \text{ m} \leq b \leq 0.9$  m nezavisno od vrednosti veće poluosa donjeg dela koncentratora  $a_2$ .



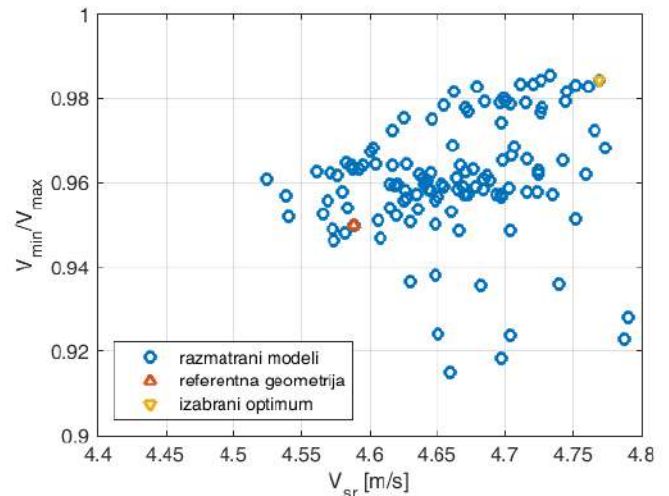
a)



b)

Slika 8. a) Srednja brzina  $V_{sr}$ , b) odnos minimalne i maksimalne brzine  $V_{min}/V_{max}$  za različite kombinacije vrednosti poluosa  $b$  i  $a_2$

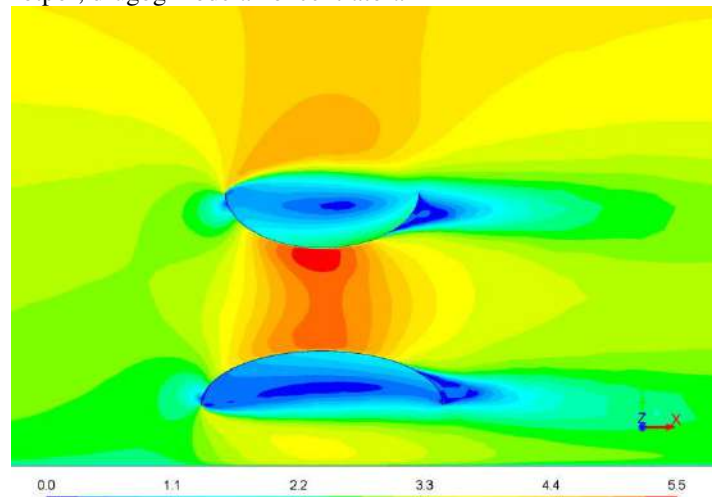
Pareto front formiran u drugom slučaju sa vrednostima dobijenim za referentnu geometriju koncentratora i naznačeni izabrani optimum ( $b = 0.9$  m,  $a_2 = 2.0$  m) ilustrirani su na slici 9. Može se zapaziti da se u ovom slučaju ostvaruju nešto veće vrednosti srednje brzine nego u prethodno razmatranom gde oba dela koncentratora imaju iste vrednosti većih poluosa,  $a_1 = a_2 = 1.6$  m.



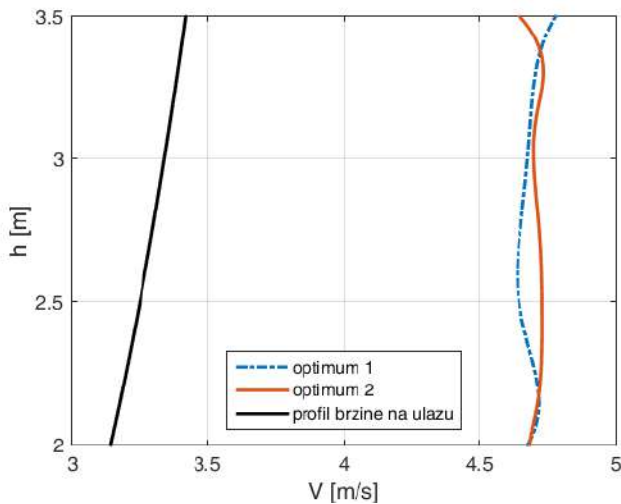
Slika 9. Dobijeni Pareto front u drugom slučaju

Konačno, i proračunato ubrzano strujno polje oko drugog optimizovanog koncentratora prikazano je na slici 10. U ovom slučaju, ostvareno je lokalno povećanje brzine sa približno 3.3 m/s na 4.72 m/s, odnosno približno 1.4 puta.

Međutim, iako su oba modela zadovoljila nametnute polazne zahteve povećanja brzine i što veće uniformnosti profila brzine (varijacija brzine po profilu  $p_2$  je oko 2%), oni su to učinili na različite načine usled svoje različite definicije. Grafik na slici 11 omogućava poređenje dobijenih profila brzine po preseku  $p_2$  dva optimuma sa profilom brzine neporemećenog strujnog polja definisanog po ulaznoj površini. Uočava se da su optimizovani profili “suprotno usmereni” (što je posledica veće relativne debljine donjeg dela u prvom, a gornjeg dela koncentratora u drugom slučaju), a sa slika 7 i 10 da je vrtložni trag, a samim tim i otpor, drugog modela koncentratora nešto veći.



Slika 10. Konture brzine oko optimalnog koncentratora u drugom slučaju



Slika 11. Proračunati profili brzine po preseku  $p_2$  dva izabrana optimuma u odnosu na profil brzine neporemećenog strujnog polja definisanog po ulaznoj površini

## VI. ZAKLJUČAK

Osnovne pouke i stečeno iskustvo iz sprovedenih optimizacionih postupaka moguće je sumirati u nekoliko osnovnih zaključaka:

### ACKNOWLEDGMENT

The research work is funded by the Ministry of Education, Science, and Technological Development of Republic of Serbia through contract no. 451-03-68/2020-14/200105.

### REFERENCE

- [1] Direktiva (EU) 2018/2001 Evropskog parlamenta i Veća o promovisanju upotrebe energije iz OI od 11.12.2018.
- [2] T. Stathopoulos *et al.*, "Urban wind energy: Some views on potential and challenges," in *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 179, 2018, pp. 146-157.
- [3] T. F. Ishugah, "Advances in wind energy resource exploitation in urban environment: A review," in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 37, 2014, pp. 613-626.
- [4] R. Kumar *et al.*, "A critical review of vertical axis wind turbines for urban applications," in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 89, 2018, pp. 281-291.
- [5] W. Qiang *et al.*, "Micrositing of roof mounting wind turbine in urban environment: CFD simulations and lidar measurements," in *Renewable Energy*, vol. 115, 2018, pp. 1118-1133.
- [6] E. Arteaga-Lopez *et al.*, "Advanced methodology for feasibility studies on building-mounted wind turbines installation in urban environment: Applying CFD analysis," in *Energy*, vol. 167, 2019, pp. 181-188.

- 1) Uvođenjem koncentratora moguće je lokalno promeniti strujno polje.
- 2) Moguće je isprojektovati nesimetrični koncentrador posebno prilagođen nadolazećem, promenljivom profilu brzine i ostvariti povećanje brzine od 1.4 puta što za sobom povlači moguće povećanje generisane snage vetroturbinе od 2.8 puta (srazmerno trećem stepenu brzine vetra).
- 3) "Loptastiji" elipsoidi (veće relativne debljine) više ubrzavaju struju vazduha, ali kod njih ranije dolazi do otcepljenja strujanja te su i generisani otpori veći.
- 4) Konačni odabir optimalnog rešenja najbolje je sprovesti uporednom analizom više značajnih izlaznih parametara. U ovom radu, akcentat je stavljen na rezultujući profil brzine, ali je moguće razmatrati bilo koji drugi faktor od interesa, kao što je oblik vrtložnog traga jer može uticati na okolne vetroturbinе ili objekte, ili aerodinamička sila koje deluje na koncentrador jer će uticati na dimenzionisanje čitave strukture.

Dalja unapređenja trenutne studije moguća su u pravcima: definisanja složenije geometrije koncentratora (drugog oblika, definisanog pomoću više ulaznih parametara), sprovođenja detaljnijih proračuna prostornog opstrujavanja samog koncentratora kao i opstrujavanja same vetroturbinе sa koncentradorom.

- [7] L. de Santoneli *et al.*, "A preliminary energy and environmental assessment of a micro wind turbine prototype in natural protected areas," in *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 8, 2014, pp. 42-56.
- [8] K. H. Wong *et al.*, "Performance enhancements on vertical axis wind turbines using flow augmentation systems: A review," in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 73, 2017, pp. 904-921.

### AUTORI

**Prvi autor** – dr Ognjen Peković, dipl.inž.maš, Univerzitet u Beogradu – Mašinski fakultet, opekovic@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 Aleksandar Simonović, dipl.inž.maš, Univerzitet u Beogradu – Mašinski fakultet, asimonovic@mas.bg.ac.rs.

**Četvrti autor** – dr Toni Ivanov, mast.inž.maš, Univerzitet u Beogradu – Mašinski fakultet, tivanov@mas.bg.ac.rs.

**Peti autor** – Dragoljub Tanović, mast.inž.maš, Univerzitet u Beogradu – Mašinski fakultet, dtanovic@mas.bg.ac.rs.

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