

Model za procenu smanjenja proizvodnje bliskih vetroelektrana usled međusobnog efekta zavetrine

Pavle Dakić, Dimitrije Kotur, Željko Đurišić
Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet,
Beograd, Srbija
dakicpavle@gmail.com
kotur@etf.rs
djurisc@etf.rs

Sadržaj—U ovom radu, analiziran je uticaj efekta zavetrine dve susedne vetroelektrane na njihovu ukupnu proizvodnju električne energije. U radu je ovaj efekat modelovan na dva načina. U prvom slučaju je jedna od vetroelektrana modelovana jednom preprekom dok je u drugom slučaju modelovana nizom prepreka pri čemu je ispitivan uticaj dubine i poroznosti prepreka/e na smanjenje proizvodnje susedne vetroelektrane. Dobijeni rezultati su pokazali da se izborom odgovarajuće dubine i poroznosti prepreke može dobiti isti efekat na smanjenje proizvodnje vetroelektrane kao i kada se analizira međusobni uticaj svakog od vetroagregata ponaosob primenom Jensenovog modela efekta zavetrine. Rezultati pokazuju da se ovakav način modelovanja može koristiti, pogotovo u najranijim fazama projektovanja vetroelektrana kada geometrija klastera vetroelektrane i modeli turbina nisu poznati.

Ključne reči - obnovljivi izvori energije; energija vetra; vetroelektrane; efekat zavetrine

I. UVOD

Energija vetra postaje jedan od najčešće korišćenih obnovljivih izvora energije. Širom sveta, nove jedinice se instaliraju, vetroturbine veće snage se razvijaju, a vetroturbine se udružuju u vetroelektrane radi veće proizvodnje energije. Tokom procesa planiranja vetroelektrane, veoma važan zadatak je minimizovati površinu koja će se koristiti za izgradnju vetroelektrane, jer se tako koristi manje skupog zemljišta i postiže se ušteda u opremi (manje kablova za povezivanje vetroagregata na elektroenergetski sistem). Međutim, minimizovanje potrebne površine vetroelektrane, pri zadatom broju vetroturbina, vodi ka smanjenju rastojanja između pojedinih vetroturbina, što istovremeno može negativno uticati na proizvodnju energije. To je posledica efekta zavetrine, (takozvanog wake efekta). Ovaj efekat je izazvan usled fenomena uzajamnog “zasenčenja” vetroturbina, što dovodi do pada brzine vetra koji dolazi do turbine koja se nalazi u “senci” ostalih jedinica.

Sam princip rada vetroturbine se bazira na oduzimanju određene kinetičke energije vetra. Ovo ima za posledicu manju brzinu vetra u nizvodnom toku te će svaka sledeća vetroturbina u oblasti “zasenčenja” dobijati manju brzinu vazdušnog toka što uzrokuje da se radna tačka na krivi snage vetroturbine ne

nalazi u optimalnoj poziciji, što se manifestuje smanjenjem proizvodnje. Sam uticaj efekta zavetrine je dosta dobro istražen i mnogobrojni načini modelovanja postoje (modeli polja (dvodimenzionalni i trodimenzionalni) i kinematički modeli (Jensenov, Larsenov, Frandsenov...)). U radovima [1-3] je detaljnije opisana problematika i fizika svakog od modela.

Proračun gubitaka usled efekta zavetrine u okviru same vetroelektrane je takođe dosta istražen i razni radovi su objavljeni na ovu temu. U radu [1] je istraženo samo modelovanje efekta zavetrine i njegovo simuliranje, što je kasnije upoređeno sa realnim merenjima. U radu [4] je izvršeno ispitivanje dalekog efekta zavetrine za različite radne režime i prečnike rotora vetroturbina u nizu. U radu [5] je detaljno istražen uticaj međusobnog rastojanja između vetroturbina u nizu za različite smerove vetra u pogledu gubitaka.

Porastom trenda izgradnje vetroelektrana polako počinje da se uočava problem uticaja međusobno bliskih vetroelektrana na proizvodnju i mehanička opterećenja usled dodatne turbulencije. Ovaj problem polako dobija na značaju i njegova analiza se može naći u par radova. U radu [6] su analizirani i verifikovani (poređenjem sa realnim merenjima) različiti modeli koji su procenjivali deficit brzine usled efekta zavetrine, dok je u radu [7] analiziran jednostavan model efekta zavetrine i koliko on odstupa za slučaj efekta zavetrine velikih susednih vetroelektrana. Međutim samo modelovanje ovog uticaja je izuzetno kompleksno i još nedovoljno istraženo.

U vetrovitim regionima često se vetroelektrane grade na udaljenostima u kojima postoji bitan međusobni uticaj usled efekta zavetrine. Prema nekim praktičnim iskustvima čak i na udaljenosti od 7 km vetroelektrane mogu bitno međusobno uticati u pogledu smanjenja proizvodnje usled efekta zavetrine. Postojeći modeli zahtevaju poznavanje pozicija vetroagregata, tipa vetroturbina i visine stubova kako bi se izvršili proračuni smanjenja proizvodnje. Ovi podaci u fazi planiranja često nisu dostupni, posebno u slučaju kada projekte razvijaju različita pravna lica, što je i najčešći slučaj.

U ovom radu se ovoj problematici pristupa na drugačiji način u odnosu na do sada korištene i nađene modele u literaturi. Sam uticaj zavetrine jedne vetroelektrane na drugu će biti modelovan čvrstom preprekom određene dimenzije, poroznosti i dubine, tako da različiti oblici klastera

vetroelektrana mogu biti obuhvaćeni ovakvim modelovanjem. čak i u najranijem vremenu projektovanja. Analiza je rađena u WAsP-u (*Wind Atlas Analysis and Application Program*) za dve identične realne vetroelektrane u regionu južnog Banata koje su nepravilnog oblika klastera. Tokom analize jedna vetroelektrana je zamenjena preprekama za koje su varirane poroznosti i dubine i upoređivani rezultati sa procenama koje su urađene primenom profesionalnih softvera. Na ovaj način je pokazano da se uticaj efekta zavetrine međusobno susednih vetroelektrana može uzvati na ovaj način.

II. EFEKAT ZAVETRINE

Vetroturbine oduzimaju vetru određenu kinetičku energiju, tako da je vetar iza vetroturbine manje snage i veće turbulentnosti. Ovaj efekat se naziva efekat zavetrine (*wake effect*), kao što je rečeno u uvodu i on je dominantan faktor pri prostornom rasporedu turbina. Snaga vetra koja se ima na vetroturbini može se proceniti jednačinom:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A^2 \cdot V^3 \quad (1)$$

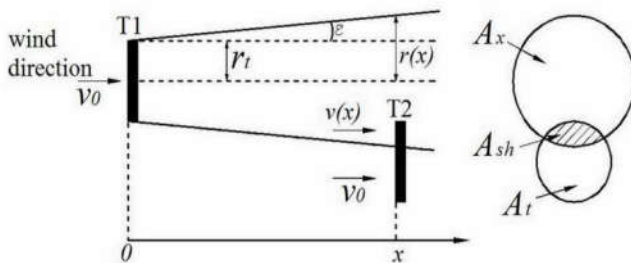
gde je ρ gustina vazduha, A površina rotora, odnosno površina kojom se obuhvata vazдушna masa. Prema tome, mala redukcija brzine vetra V rezultuje nesrazmerno velikim smanjenjem snage vetra.

Na Sl 1 je prikazan efekat zavetrine između dve vetroturbine T1 i T2, gde je pretpostavljeno da vetar prvo nailazi na turbinu T1. Smanjenje brzine vetra se može proceniti prema sledećoj relaciji (model koji je razvijen u RISO institutu u Danskoj):

$$v(x) = v_0 \cdot \left(1 - 2 \cdot a \cdot \left(\frac{r_t}{r(x)} \right)^2 \right) \quad (2)$$

$$r(x) = r_t + \tan(\varepsilon) \cdot x \quad (3)$$

U jednačinama (1 i 2) su: v_0 - početna brzina vetra, r_t - poluprečnik turbine, $\tan(\varepsilon)$ - koeficijent širenja zavetrine, $r(x)$ - poluprečnik tunela zavetrine na rastojanju x i a - aksijalni indukcionni faktor koji se može proračunati preko koeficijenta pritiska vetra C_T .



Slika 1. Model efekta zavetrine [8]

Pored smanjenja brzine vetra, dolazi i do širenja strujnica vazduha pri prolasku kroz vetroturbinu, tako da front vazduha koji je zahvaćen efektom zavetrine ima površinu Ax .

Oblast zavetrine se može podeliti na nekoliko zona: bliska zavetrina, srednja zavetrina i daleka zavetrina, Blisku zonu karakteriše smanjenje brzina vetra, dok pritisak raste do vrednosti koja je bila u slobodnom toku. Prečnik bliske zavetrine raste dok brzina opada do određene vrednosti dokle god pritisak ne dostigne vrednost koju je imao u slobodnom toku, što je u skladu sa zakonom o održanju mase i zakonom o održanju impulsa. Srednja zavetrina ima osobinu da je pritisak konstantan na celom intervalu i jednak je pritisku u slobodnom toku, brzina duž centralne linije je konstantna, dok se turbulentno mešanje povećava na spoljašnjem graničnom sloju zavetrine. Daleka, zavetrina ima slične osobine kao srednja sa razlikom da brzina vetra duž centralne linije usled turbulentnog mešanja ravnomerno raste do vrednosti u neometenom toku.

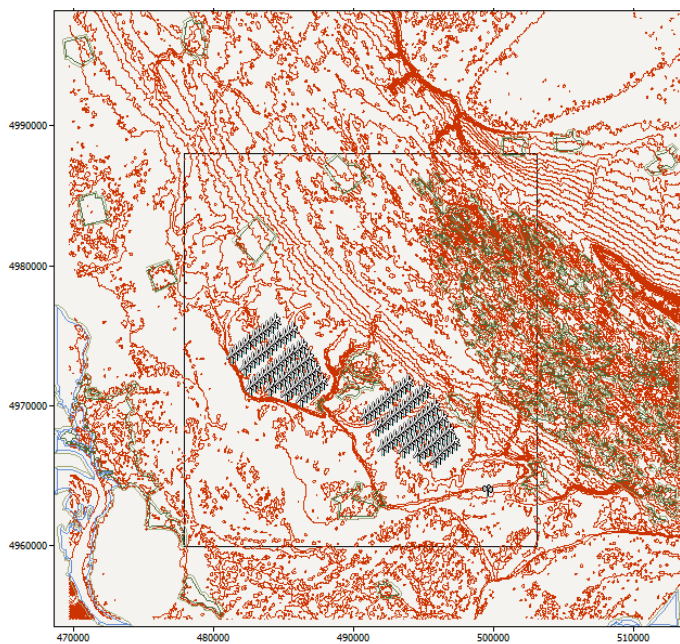
Dužina svake od ovih zona zavisi od prečnika rotora, ali i drugih parametara (ambijentalne turbulencije, koeficijenta potiska turbine itd.) i ima posebna svojstva koja zavise od brzine vetra, pritiska i geometrije vetroelektrane. Na osnovu svojstava svake zone, kao i od brzine vetra u toku godine i ruže vetrova, optimalna distanca između vetroturbin se može odabrati kako bi se osigurao minimalan uticaj jedne turbine na drugu.

Osim smanjenja snage usled efekta zavetrine druga posledica se ogleda u povećanju intenziteta turbulencije vazduha. Povećan intenzitet turbulencije ne umanjuje značajno proizvodnju, mada može imati uticaja na krivu snage, što može praviti problem prilikom upravljanja vetroturbinom (u zavisnosti od tipa vetroturbin i načina regulacije snage), a što je još opasnije samo povećanje turbulencije povećava mehanička naprezanja i uzrokuje dodatni zamor materijala. Ovo za posledicu ima skraćivanje životnog veka komponenata turbine (posebno lopatica) kao i nedozvoljen radni režim. Ovaj efekat nije razmatran u ovom radu.

III. MEĐUSOBNI EFEKAT ZAVETRINE BLISKIH VETROELEKTRANA

Kada neka vetroelektrana proizvodi električnu energiju, ona će oduzimati deo kinetičke energije vazduha koji je opstrujava, što će dovesti do smanjenja brzine vetra koji dolazi do naredne vetroelektrane.

U ovom poglavlju analiziran je uticaj jedne vetroelektrane na smanjenje proizvodnje druge vetroelektrane, koja se nalazi u njenoj neposrednoj blizini. Sve analize vršene su upotrebom softverskog paketa WAsP. Planirana lokacija obe vetroelektrane nalazi se u okolini sela Bavanište. U svim analizama, pretpostavljena je izgradnja dve vetroelektrane istih dimenzija. Za proračun vetropotencijala korišćeni su realni merni podaci na ciljnoj lokaciji. Na Sl. 2 prikazana je topografska mapa zajedno sa analiziranim vetroelektranama.



Slika 2. Topografska karta analizirane lokacije

Na osnovu godišnjih merenja brzina vetra, dobijeni su parametri Weibull-ove raspodele brzine vetra na mernoj lokaciji, kao i ruža vetrova. Ruža vetrova je naročito značajna za analize obrađene u ovom radu jer pokazuje koliko se zaista jedna vetroelektrana nalazi u zavetrini druge. Na Sl. 3 prikazana je dobijena ruža vetrova. U Tabeli I prikazani su dobijeni pokazatelji brzine vetra na ciljnoj lokaciji.

TABELA I. POKAZATELJI POTENCIJALA VETRA NA VISINI 60 M

<i>Srednja brzina vetra [m/s]</i>	<i>Srednja gustina snage vetra [W/m²]</i>	<i>Parametar k</i>	<i>Parametar c</i>
5,89	280	1,69	6,5

Na osnovu ruže vetrova može se zaključiti da je međusobna pozicija vetroelektrana dosta nepovoljna obzirom da se obe nalaze u pravcu dominantnog smera vetra. U daljim simulacijama, vršena je analiza uticaja desne vetroelektrane na smanjenje proizvodnje leve i obrnuto. U tom cilju, u WASP-u su vršene simulacije gde je prvo izvršen proračun godišnje proizvodnje leve vetroelektrane kada ne postoji desna, i obrnuto, a zatim proračun godišnje proizvodnje svake kada postoje obe vetroelektrane. U Tabeli II prikazani su rezultati ovih analiza.

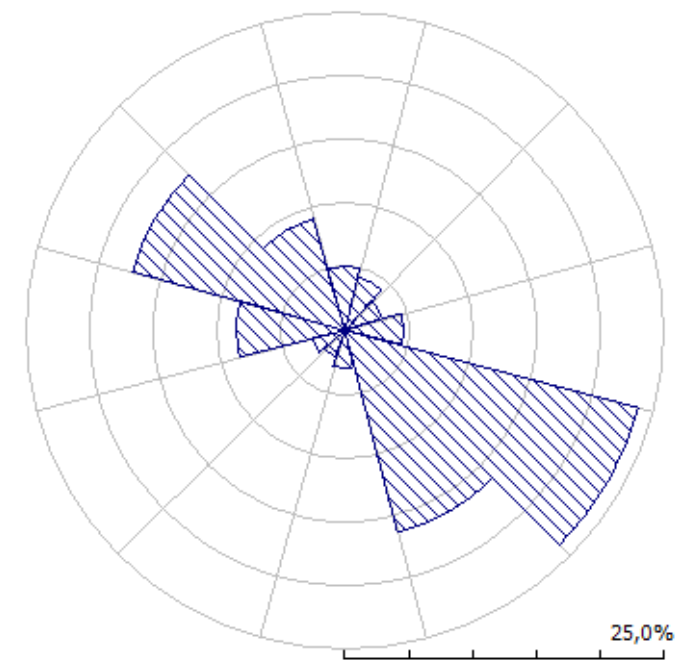
Rezultati analiza prikazani u Tabeli II pokazuju da međusobni uticaj dve vetroelektrane dovodi do smanjenja proizvodnje svake od njih, pri čemu smanjenje proizvodnje leve vetroelektrane iznosi 1,981%, a desne 1,986%, što je značajno manje od smanjenja proizvodnje usled wake efekta u okviru jedne vetroelektrane.

TABELA II. PODACI I PROIZVODNJI VETROELEKTRANA

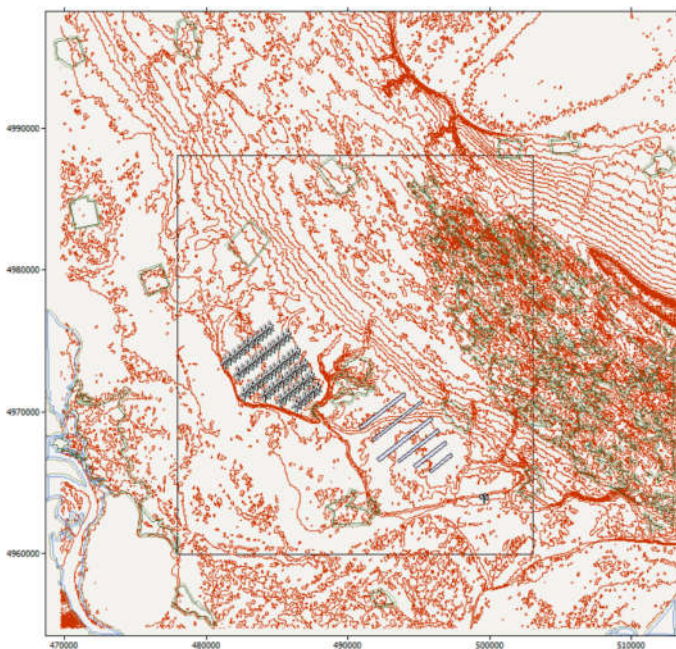
	<i>Leva vetro elektrana samostalno</i>	<i>Desna vetro elektrana samostalno</i>	<i>Leva vetro elektrana u prisustvu desne</i>	<i>Desna vetro elektrana u prisustvu leve</i>
Neto proizvodnja [GWh]	344,246	348,967	343,564	348,274
Gubici usled wake efekta [%]	6,31	6,29	6,49	6,48

IV. MODELOVANJE VETROELEKTRANE POROZONOM PREPREKOM

U prethodnom poglavlju, u programskom paketu WASP izvršena je analiza uticaja jedne vetroelektrane na proizvodnju druge. Za primenu ovog proračuna bilo je neophodno poznavati mikropozicije svih vetroagregata u obe vetroelektrane, kao i tipove vetroturbin i visine stubova na kojima su postavljene. Ovi podaci često nisu dostupni, pa se proračun međusobnog efekta zavetrine ne može sprovesti primenom klasičnih modela koji su integrisani u profesionalne komercijalne softvere. Osnovna ideja u ovom radu je da se jedna vetroelektrana modeluje kao prepreka određene geometrije i poroznosti. Modelovanje je vršeno na dva načina. U prvom slučaju, susedna vetroelektrana se modeluje nizom prepreka, u kojima se svaki klaster vetroturbin modeluje jednom preprekom. Turbine se najčeće grupišu tako da jedan red predstavlja jedan klaster. Na Sl. 4 i Sl. 5 prikazana je topografska mapa vetroelektrane sa predloženim oblikom prepreka.



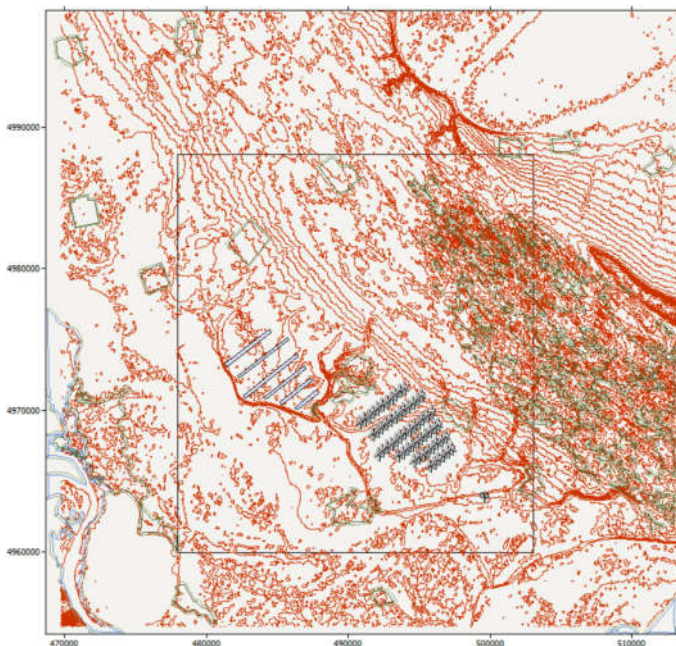
Slika 3. Ruža vetrova na ciljnoj lokaciji



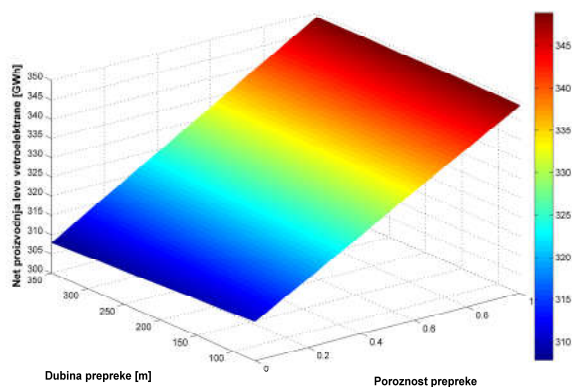
Slika 4. Modelovanje desne vetroelektrane nizom prepreka

Sa Sl. 4 i Sl. 5 može se videti da je svaki red vetroturbina zamenjen preprekom određene poroznosti i dubine. Kroz uporednu analizu sa proračunima koji su urađeni u WASP-u primenom klasičnog modelovanja, moguće je odrediti tačnu vrednost poroznosti prepreke i njenu dubinu koja će na dovoljno dobar način ekvivalentirati uticaj vetroturbine na parametre zavetrine.

Nakon ovoga, izvršen je proračun proizvodnje vetroelektrane za različite vrednosti poroznosti i dubine prepreke. Visina prepreke jednaka je visini jedne vetroturbine (visina stuba u zbiru sa poluprečnikom rotora) i iznosi 150m.



Slika 5. Modelovanje leve vetroelektrane nizom prepreka

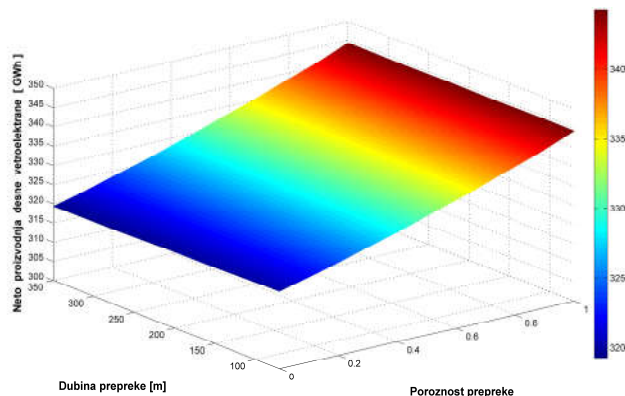


Slika 6. Zavisnost neto proizvodnje leve vetroelektrane od dubine i poroznosti prepreke

Na Sl. 6 i Sl. 7 prikazani su dijagrami neto proizvodnje vetroelektrane kada je druga vetroelektrana modelovana preprekom različitih vrednosti poroznosti i dubina.

Sa Sl. 6 i Sl. 7 može se zaključiti da promena poroznosti prepreke dosta više utiče na promenu proizvodnje susedne vetroelektrane od promene dubine prepreke. Upravo zbog toga može se zaključiti da je poroznost prepreke ključna za ekvivalentiranje reda vetroturbina jednom preprekom, te se dobijenom poroznošću može ekvivalentirati proizvoljan red vetroturbina. Sa druge strane, dubina prepreke može se posmatrati kao fino podešavanje ekvivalentnog modela vertikalnog reda vetroturbina. Dobijena vrednost poroznosti odgovarajuće prepreke za modelovanje leve vetroelektrane iznosi 0,978 dok je dubina prepreke 94m. Za modelovanje desne vetroelektrane dobijena vrednosti za poroznost iznosi 0,833, dok je dubina prepreke 131m.

U prethodnoj analizi, vetroelektrana je modelovana nizom prepreka, pri čemu svaka prepreka predstavlja jedan red vetroturbina. U narednoj analizi ide se korak dalje, i postavlja se pitanje da li je moguće celu vetroelektranu modelovati samo jednom preprekom odgovarajuće poroznosti. Smisao ove analize je da se i pre postavljanja vetroturbina, samo na osnovu poznate raspoložive površine proceni kakav će biti uticaj buduće vetroelektrane na proizvodnju već postojeće vetroelektrane.



Slika 7. Zavisnost neto proizvodnje desne vetroelektrane od dubine i poroznosti prepreke

V. ZAKLJUČAK

U ovom radu, analiziran je drugačiji način modelovanja vetroelektrane u pogledu uticaja na efekat zavetrine druge susedne vetroelektrane. Sam način modelovanja efekta zavetrine je izuzetno praktičan i lak za primenu. Dobijeni rezultati, za analizirani slučaj dve već simulirane vetroelektrane, su pokazali da se ovakvim načinom modelovanja ne gubi puno na tačnosti sa aspekta procene proizvodnje dve susedne vetroelektrane.

Ovakvim modelovanjem se može ispitati ovaj uticaj već u najranijem periodu projektovanja i računanja proizvodnje buduće vetroelektrane gde geometrija klastera i modeli vetroturbinu još nisu poznati. Takođe ovakvim načinom modelovanja se štedi i u smislu vremena potrebnog za modelovanje i proračun uticaja efekta zavetrine u odnosu na druge modele.

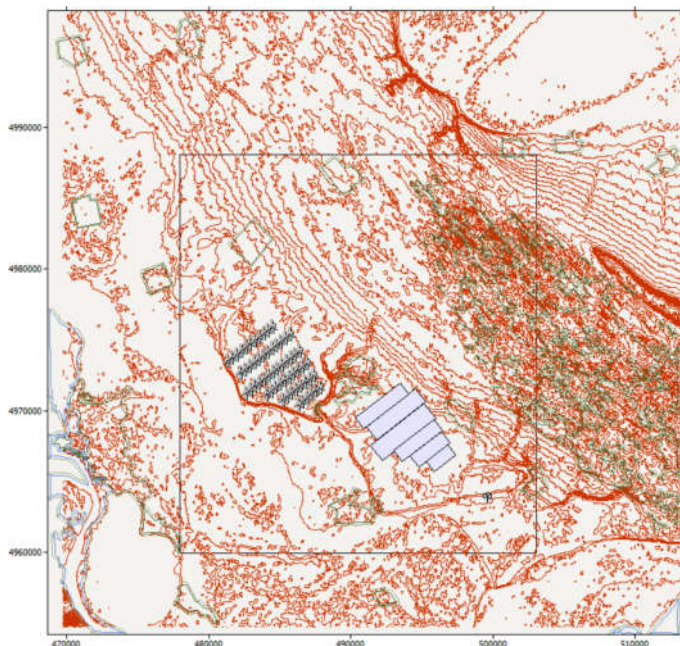
Naravno da ovaj model ima i nedostatke koji se ogledaju u ne uvažavanju uticaja efekta zavetrine po pitanju porasta turbulencije što uzrokuje dodatna mehanička naprezanja i zamor materijala. Takođe, kako ovaj model nije opšti, ostalo je dosta prostora za dalje analize po pitanju kako sama hrapavost prepreke može upotpuniti ovaj način modelovanja, gde bi se obuhvatio i efekat različitih profila vetrova na globalni uticaj efekta zavetrine. Sami koeficijenti poroznosti zavise od ruže vetrova i od topografije terena, što nije analizirano ni utvrđeno u radu.

Na kraju, ovaj rad pokazuje da ovakav model uticaja efekta zavetrine susednih vetroelektrana ima veliki potencijal, te ga u budućnosti treba dodatno proučavati i detaljnije istraživati.

LITERATURA

- [1] C. Hwang, J.H. Jeon, G.H. Kim, E. Kim, M. Park, I.K. Yu -Modelling and simulation of the wake effect in a wind farm, 2015, Journal of International Council on Electrical Engineering, 5:1, 74-77, DOI:10.1080/22348972.2015.1109793
- [2] D. J. Renkema - Validation of wind turbine wake , Master of Science Thesis. June 2007, Delft University of Technology
- [3] S. Rakić – Uticaj efekta zavetrine na efikasnost vetroelektrana, master rad, septembar 2014., Univerzitet u Beogradu
- [4] V L Okulov, I V Naumov, R F Mikkelsen, J N Sørensen – Wake effect on a uniform flow behind wind-turbine model, 2015, Journal of Physics: Conference Series 625 (2015) 012011 doi:10.1088/1742-6596/625/1/012011
- [5] Ismail, S. Kamal, Purnomo, Sarjiya, S. Tampubolon - Wake Effect and Power Production of Wind Turbine Arrays, 2015, Modern Applied Science; Vol. 9, No. 11;
- [6] KS Hansen, P-E Réthoré, J Palma, BG Hevia, J Prospathopoulos, A Peña, S Ott, G Schepers, A Palomares, MP van der Laan, P Volker - Simulation of wake effects between two wind farms, Journal of Physics: Conference Series 625 (2015) 012008 doi:10.1088/1742-6596/625/1/012008
- [7] N. G. Nygaard, S. D. Hansen - Wake effects between two neighbouring wind farms, 2016, Journal of Physics: Conference Series 753 (2016) 032020 doi:10.1088/1742-6596/753/3/032020.
- [8] Ž. Đurišić – Vjetroelektrane, skripta, Beograd, 2013

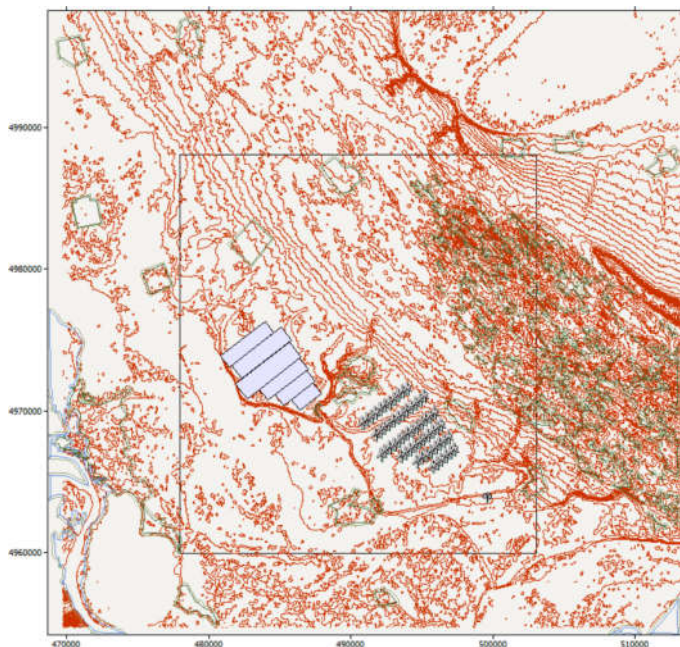
ABSTRACT



Slika 8. Postavljanje prepreke na čitavom prostoru proizvodnje desne vetroelektrane

Na Sl. 8 i Sl. 9 prikazana je topografska mapa terena u kojoj je čitava površina koju treba da zauzima vetroelektrana zamenjena jednom preprekom.

Rezultati ovih analiza pokazuju da poroznost čitave prepreke treba da bude 0,98 za levu vetroelektranu dok za desnu vetroelektranu poroznost treba da bude 0,84, što se ne razlikuje puno više u odnosu na rezultate dobijene u prethodnim analizama. Ovaj rezultat je i očekivan obzirom da poroznost prepreke dosta više utiče na proizvodnju vetroelektrane u odnosu na njenu dubinu.



Slika 9. Postavljanje prepreke na čitavom prostoru proizvodnje leve vetroelektrane

This paper addresses the issue of wake effect between two neighbouring wind farms regarding the aspect of total energy production. In the paper this effect is modeled in two ways. In first one, one of the wind farms is modeled as one obstacle, while in second one the same wind farm is modeled with several obstacles where is analyzed influence of porosity and depth of the obstacle(s) on reduced energy production of second wind farm. Given results showed that with the right choice of depth and porosity of the obstacle same effect on energy production can be simulated as when as it is used Jensen model for wake effect for each turbine separately. The

obtained results showed that this way of modeling can be used, especially in case of earliest phase of planning the future wind park, where geometry of windfarm and catalogs of wind turbines are unknown.

**MODEL FOR EVALUATION WAKE EFFECT OF
NEIGHBOURING WIND FARMS ON PRODUCED
ENERGY**

Pavle Dakić, Dimitrije Kotur, Željko Đurišić