

# OCENA RAZPOLOŽLJIVE VETRNE ENERGIJE

BOŠTJAN ZAJEC

Fakulteta za matematiko in fiziko  
Univerza v Ljubljani

Vetrna energija je v zadnjem času zaradi želje po zagotavljanju energije iz obnovljivih virov vse bolj v ospredju, a je z njo žal povezanih tudi veliko zmot. V članku so predstavljene osnove fizike vetra in vetrnic ter poenostavljen model izračuna razpoložljive vetrne energije na osnovi splošno dostopnih meteoroloških podatkov. Na koncu je izračun primerjan z izmerjenimi podatki male vetrne elektrarne na Kredarici.

## EVALUATION OF WIND POWER SITE POTENTIAL

In recent times, the demand of alternative energy is increasing and as a renewable resource, wind power is gaining its popularity. While many countries have had great success with its implementation, there are still many misconceptions about its realistic potentials and physical background. In the article we discuss the basics of wind physics (aerodynamics) and wind site evaluation on the example of Kredarica micro wind turbine.

### 1. Uvod

Vetrna energija je obnovljiv vir, ki ga človek v različnih oblikah izkorišča že iz antike. Sprva je bila uporabljena predvsem pri črpanju vode in mletju žita, danes pa jo večinoma uporabljamo za proizvodnjo električne energije.

Današnje ocene razpoložljive globalne moči vetra se gibljejo v širokem razponu 10 – 100 TW [5], a tudi na spodnji meji presegajo današnje potrebe po električni energiji. Skupna inštalirana moč vseh vetrnih elektrarn na svetu konec leta 2015 je znašala 433 GW [4], kar pomeni, da so možnosti za širitev velike. Kljub velikemu potencialu je pomembno, da se zavedamo osnovnih fizikalnih omejitev pri njenem izkoriščanju.

### 2. Nastanek in lastnosti vetra

Globalni vetrovi so posledica tlačnih razlik med različnimi deli zemeljskega površja, ki nastanejo kot posledica segrevanja zračnih mas pod vplivom sončnega obsevanja na različnih zemljepisnih širinah. Razlike v sončnem obsevanju povzročijo neenakomerno segrevanje ozračja, pojavijo se razlike v gostoti in posledično tudi gradient zračnega tlaka. Ravnoesje v atmosferi se nato vzpostavlja s premikanjem zračnih mas od višjega k nižjemu tlaku.

Lokalni tlačni razliki v vertikalni smeri v veliki meri nasprotuje sila teže na ozračje, zato vetrovi pihajo predvsem v horizontalni smeri in se odzivajo na horizontalni gradient tlaka.

Najenostavneje dogajanje v atmosferi opišemo, kadar gradient tlaka določajo ravne izobare in je trenje zračnih mas s podlago zanemarljivo. Takrat lahko uporabimo približek gradientnega ravnovesja. Pravokotno na smer gibanja sta v ravnovesju sili gradienta tlaka  $F_p$  in Coriolisova sila  $F_c$

$$F_c = fV = 2\Omega \sin \Phi \cdot V$$
$$F_p = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n},$$

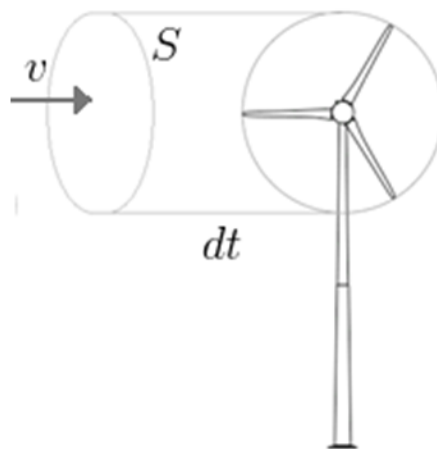
kjer je  $f$  Coriolisov parameter, podan s kotno hitrostjo rotacije vrtenja zemlje  $\Omega$  in zemljepisno širino  $\varphi$ ,  $\rho$  gostota zraka in  $n$  smer gradienta tlaka. Kadar sta sili v ravnovesju, veter piha pravokotno na izobare s hitrostjo

$$V = -\frac{1}{f\rho} \frac{\partial p}{\partial n}.$$

Opisani približek lahko uporabimo le pri ravnih izobarah in na dovolj veliki nadmorskih višini. Na manjših višinah, pri kakršnih z vetrnicami izkoriščamo energijo vetra, je dinamiko težko opisati zaradi vpliva oblike in strukture reliefa, ki povzročata upor in turbulenco. Iz navedenih razlogov gibanje zračnih podrobnije obravnavamo z meteorološkimi numeričnimi modeli, ki temeljijo na opisanih principih.

### 3. Moč zračnega toka in vetrovni potencial

Razpoložljiva moč vetra na vetrnici je odvisna od količine kinetične energije, ki se pretoči čez rotor vetrnice v danem časovnem intervalu. Za obravnavo vzemimo vetrnico z diskastim rotorjem s površino  $S$ , na katerega piha veter s hitrostjo  $v$  in gostoto  $\rho$ .



Slika 1: Model vetrnice, čez katero piha veter.

V časovnem intervalu  $dt$  prečka rotor zrak z maso

$$dm = \rho S v dt,$$

količina kinetične energije v časovni enoti oz. moč zračnega toka pa nato sledi iz enačbe

$$P = \frac{dW_k}{dt} = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} v^2 = \frac{1}{2} \rho S v^3. \quad (1)$$

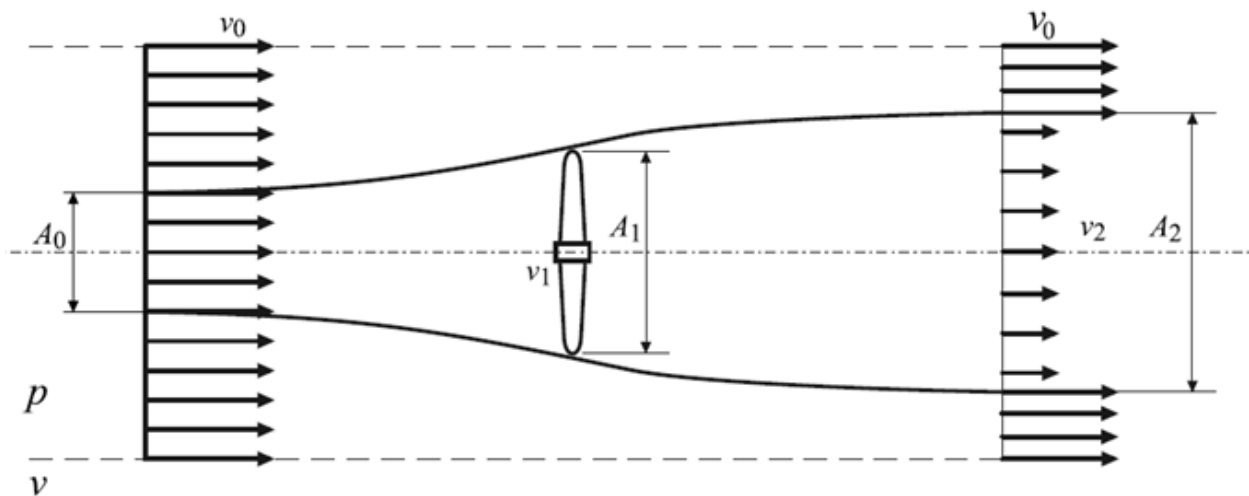
Kot je razvidno, je razpoložljiva moč vetra odvisna od tretje potence hitrosti vetra, kar pomeni, da lahko že zelo majhne spremembe povzročijo velike razlike v količini razpoložljive energije. Povprečno razpoložljivo moč na enoto površine rotorja  $P/S$  imenujemo vetrovni potencial.

Tako izračunana moč vetra predstavlja najpomembnejšo omejitev za moč vetrnice na danem območju, saj več energije, kot jo ima veter ne moremo pridobiti.

### 4. Omejitve izkoristka - Betzov zakon

Podobno kot v termodinamiki toplotni stroj ne more pretvoriti vse dovedene toplote v mehansko delo, tudi vetrnice ne morejo izkoristiti vse kinetične energije vetra izračunane v prejšnjem poglavju. Če bi zraku odvzeli vso kinetično energijo, bi zrak za vetrnico obstal, kar bi onemogočilo nadaljnji pretok zraka in s tem prenos energije na vetrnico. Največji možni izkoristek vetrnice opisuje Betzov zakon, ki ga je leta 1919 izpeljal nemški fizik Albert Betz.

Predpostavimo, da je rotor idealen, z neskončnim številom lopatic, ki prestrežejo ves veter in na njih ni zračnega upora. Ko veter piha skozi vetrnico, se ohranja masni pretok zraka, pri čemer lahko zaradi majhnih tlačnih razlik zrak pri prehodu čez vetrnico obravnavamo kot nestisljivo tekočino s stalno gostoto. Ker se toku zraka hitrost za vetrnico zmanjša, se mu mora povečati krožni presek:



Slika 2: Spreminjanje hitrosti in preseka zračnega toka na vetrnici (M. Tuma, M. Sekavčnik, ESN, 2009) [3].

Nadalje za obravnavo razdelimo tok zraka skozi vetrnico na tri dele. V prvem delu, pred vetrnico piha veter nemoteno s hitrostjo  $v_0$  skozi presek  $A_0$ , v drugem delu na lopaticah vetrnice piha skozi  $A_1$  s hitrostjo  $v_1$ , daleč za vetrnico pa piha skozi presek  $A_2$  s hitrostjo  $v_2$ . Masni tok zraka je na vseh mestih enak:

$$\begin{aligned} \dot{m}_0 &= \dot{m}_1 = \dot{m}_2 \\ \rho_0 A_0 v_0 &= \rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2. \end{aligned}$$

Sila na vetrnico  $F$  se pojavi zaradi spremembe hitrosti oz. gibalne količine zraka. Od zdaj naprej označimo presek vetrnice z  $A = A_1$ .

$$F = \frac{d(mv)}{dt} = \dot{m} \Delta v = \rho A v_1 (v_2 - v_1).$$

Moč vetra na vetrnici lahko izrazimo s pomočjo sile in hitrosti, hkrati pa tudi preko spremembe kinetične energije kot

$$\begin{aligned} P &= Fv = \rho A v_1^2 (v_2 - v_1) \\ P &= \frac{1}{2} \dot{m} (v_0^2 - v_2^2) = \frac{1}{2} \rho A v_1 (v_0^2 - v_2^2). \end{aligned}$$

Iz obeh enačb sledi, da je hitrost vetra na vetrnici aritmetična sredina hitrosti pred in za vetrnico,  $v_1 = \frac{1}{2}(v_0 + v_2)$ . S pomočjo te zveze lahko izrazimo  $v_1$  in  $v_2$  s hitrostjo vetra  $v_0$ , kar nam omogoča, da izrazimo moč v odvisnosti od razmerja vhodne in izhodne hitrosti ( $v_2/v_0$ ) vetrnice:

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{2} \rho A v_1 (v_0^2 - v_2^2) = \frac{1}{4} \rho A (v_0 + v_2) (v_0^2 - v_2^2) = \\ &= \frac{1}{4} \rho A v_0 \left(1 + \frac{v_2}{v_0}\right) (v_0^2 - v_2^2) = \frac{1}{4} \rho A v_0^3 \left(1 + \frac{v_2}{v_0}\right) \left(1 - \left(\frac{v_2}{v_0}\right)^2\right). \end{aligned}$$

Z odvajanjem te enačbe lahko določimo ekstrem moči vetrnice pri razmerju hitrosti  $v_2/v_0 = 1/3$ , torej ko je hitrost vetra za vetrnico v primerjavi s tisto pred njo, manjša za  $2/3$ . Takrat znaša moč na vetrnici

$$P_{max} = \frac{16}{27} \cdot \frac{1}{2} \rho A v_0^3. \quad (2)$$

V idealnem primeru lahko torej izkoristimo  $16/27 \approx 59,3\%$  vse kinetične energije vetra. To vrednost imenujemo Betzova limita ali aerodinamični izkoristek.

V praksi dobljeni izkoristek zmanjšujejo naslednji dejavniki:

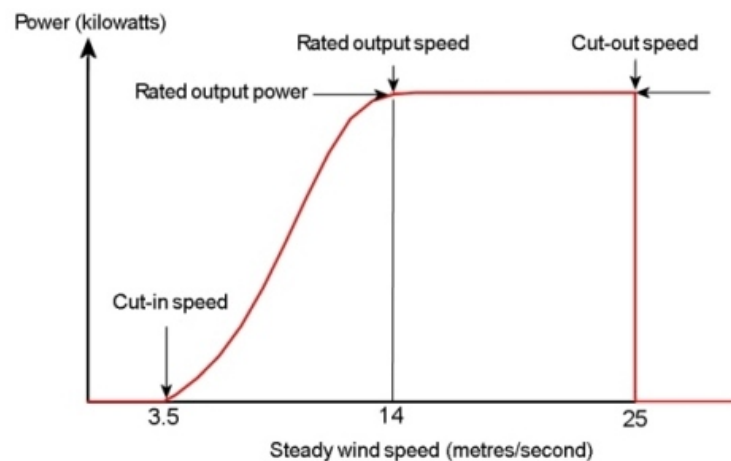
- rotacija zračnih mas za vetrnico,
- končno število lopatic in z njimi povezane izgube na koncih, pihanje vetra med lopaticami,
- kvadratni zakon upora na površini lopatic.

Današnje vetrnice dosegajo izkoristke med 45 in 50 %, kar znaša 75 do 85 % teoretične vrednosti (2). S pomočjo teh števil in enačbe za moč zračnega toka (1) lahko preko hitrosti vetra dobimo realistično razpoložljivo moč na določeni lokaciji.

## 5. Statistična analiza razpoložljive moči

Zaradi kubične odvisnosti razpoložljive moči od hitrosti vetra je za oceno (ekonomske) smotrnosti izkoriščanja vetrne energije na določenem območju potrebno čim boljše poznavanje hitrosti vetra.

Mehanske omejitve vetrnice določajo minimalno hitrost vetra, pri kateri je navor dovolj velik, da se lahko začne proizvodnja energije, pri velikih hitrostih pa moč vetra preseže moč generatorja in presežka ni mogoče uporabiti. Tipično odvisnost moči generatorja od hitrosti vetra kaže Slika 2. Zaradi teh omejitev ni vseeno, kolikšen delež časa je na območju prisotna določena hitrost vetra. Poznavanje porazdelitve hitrosti je pomembno tudi za optimalno dimenzioniranje rotorja in pripadajočega generatorja, da ne pretiravamo z velikostjo enega ali drugega.



Slika 2: Moč na generatorju vetrnice v odvisnosti od hitrosti vetra [7].

Zaradi težavnosti meritev imajo natančni podatki o hitrosti vetra visoko ceno in strateško vrednost, zato največkrat niso javno dostopni, nekatera podjetja pa jih smatrajo celo za poslovno skrivnost. Pogosto je tako namesto časovne vrste podatkov enostavno dostopna le povprečna hitrost vetra, ki jo merijo številne državne in zasebne meteorološke postaje.

Predpostavka, da lahko energijo pridobivamo ves čas ob povprečni hitrosti vetra je za večino praktičnih uporab pregruba, saj povprečna vrednost kuba vetrne hitrosti  $\bar{v}^3$  ni enaka kubu povprečne vrednosti  $\bar{v}^3$ .

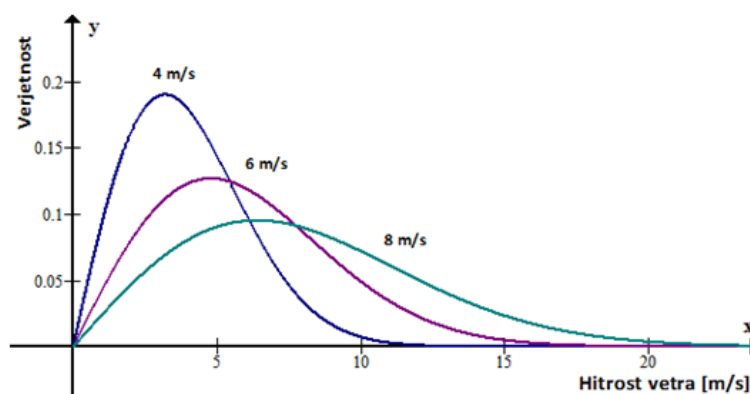
Pomagamo si lahko z analitičnimi porazdelitvami hitrosti vetra, s katerimi lahko določimo s kakšnimi verjetnostmi se bodo določene hitrosti vetra pojavljale. V ta namen uporabljamo porazdelitvi opisani v naslednjih dveh poglavjih.

### 5.1 Rayleighjeva porazdelitev

Rayleighjeva porazdelitev je zvezna porazdelitev verjetnosti za naključno pozitivno realno spremenljivko. Velikosti hitrost vetra je Rayleighjevo porazdeljena, kadar horizontalni komponenti vektorja hitrosti nista korelirani in imata enake variance. Podana je z enim samim parametrom, povprečno hitrostjo vetra.

$$p(v) = \frac{\pi}{2} \left( \frac{v}{\bar{v}} \right) \exp \left[ -\frac{\pi}{4} \left( \frac{v}{\bar{v}} \right)^2 \right] \quad (3)$$

Na grafu porazdelitve (3) lahko vidimo, da večja kot je povprečna hitrost vetra, z večjo verjetnostjo se pojavljajo visoke hitrosti vetra. Nizke hitrosti so v vsakem primeru bolj zastopane od visokih.



Slika 3: Rayleighjeva porazdelitev za različne povprečne hitrosti  $v$  [2].

Ker je Rayleighjeva porazdelitev enoparametrična, je običajno pregrub približek, zato namesto nje uporabljamo dvoparametrično Weibullovo porazdelitev.

### 5.2 Weibullova porazdelitev

Kadar je poleg povprečne hitrosti vetra znan tudi njen standardni odklon (varianca), si lahko pomagamo z Weibullovo porazdelitvijo. Za njeno določitev potrebujemo parametra  $k$  in  $c$ , pri čemer je  $k$  oblikovni in  $c$  velikostni faktor:

$$p(v) = \frac{k}{c} \left( \frac{v}{c} \right)^{k-1} \exp \left[ -\left( \frac{v}{c} \right)^k \right]. \quad (4)$$

Oba parametra sta funkciji tako povprečne hitrosti vetra  $\bar{v}$ , kot njenega standardnega odklona  $\sigma_v$ , določimo pa ju lahko prek zveze

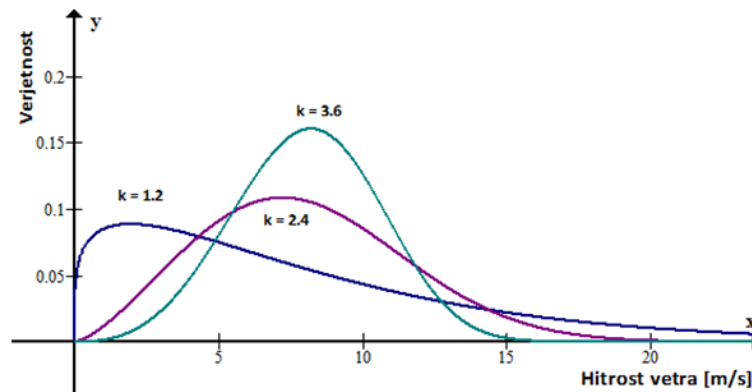
$$\bar{v} = c \Gamma \left( 1 + \frac{1}{k} \right).$$

Določanje parametrov z Gamma funkcijo je težavno, zato lahko uporabimo empirični približek

$$k = \left( \frac{\sigma_v}{\bar{v}} \right)^{-1.086}$$

$$c = \bar{v} (0.568 + 0.433/k)^{-\frac{1}{k}}.$$

Pri vrednosti  $k = 2$  je  $\Gamma(3/2) = \pi/4$  in zato Weibullova porazdelitev enaka Rayleighjevi. Na spodnjem grafu je prikazana Weibullova porazdelitev s povprečno hitrostjo vetra 6 m/s z različnimi vrednostmi parametra  $k$ :



Slika 4: Weibullova porazdelitev pri  $v = 6$  m/s in različnih parametrih  $k$  [2].

Kadar imamo na voljo podatke v obliki časovne vrste, namesto numeričnih približkov za prilagajanje parametrov uporabimo metodo najmanjših kvadratov.

### 5.3 Ocena izkoriščenosti in možne proizvodnje

Na podlagi Rayleighjeve in Weibullove porazdelitve lahko glede na najmanjšo in največjo obratovno hitrost vetrnice določimo, koliko časa bo delovala ter kakšen bo njen faktor izkoriščenosti – razmerje proizvedene energije v primerjavi s proizvodnjo, če bi ves čas obratovala na polni moči.

Kolikšen delež časa bo vetrnica obratovala izračunamo z enačbo (5), v kateri je  $p(v)$  porazdelitev po hitrosti vetra  $v$ :

$$\eta = \int_{v_{\min}}^{v_{\max}} p(v) dv. \quad (5)$$

Podobno lahko ob predpostavki, da je moč vetrnice odvisna samo od  $v^3$ , določimo faktor izkoriščenosti s pomočjo integrala porazdelitve

$$\frac{\bar{P}}{P_{\max}} = \frac{1}{P_{\max}} \int_{v_{\min}}^{v_{\max}} p(v) \cdot \frac{1}{2} \rho A v^3 dv = \frac{1}{v_{\max}^3} \int_{v_{\min}}^{v_{\max}} p(v) v^3 dv. \quad (6)$$

Z uporabo pravkar navedenih enačb in Rayleighjeve porazdelitve lahko za vetrnico, ki maksimalno moč doseže pri hitrosti vetra 10 m/s ter obratuje v hitrostnem intervalu od 2.5 m/s do 25 m/s napovemo, da bo pri povprečni hitrosti vetra 5 m/s obratovala 82 % časa, njena povprečna moč pa bo 21 % nazivne moči.

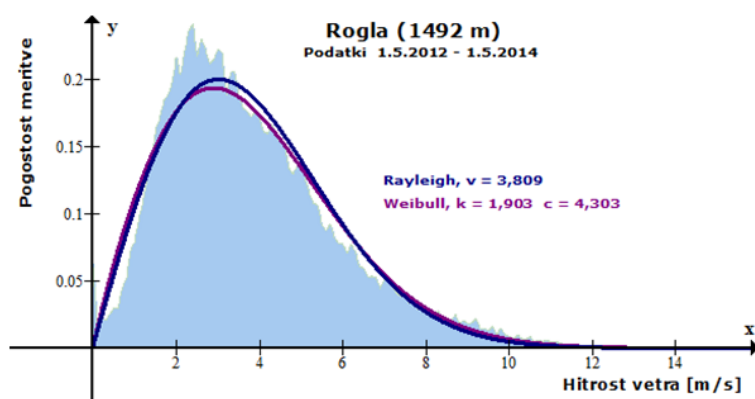
S pomočjo podobnih ocen in enačbe za moč so na podlagi meteoroloških podatkov izračunane tudi globalne ocene možne letne proizvodnje oz. *povprečne* razpoložljive moči omenjene v uvodu.

#### 5.4 Primerjava porazdelitev z izmerjenimi podatki

Podatki nekaterih meteoroloških postaj Agencije za Republike Slovenije Okolje so na voljo tudi v obliki časovne vrste, kjer so zapisana polurna povprečja hitrosti vetra. Za obravnavo so najprimernejša gorska področja, npr. Rogla, Krvavec in Kredarica, saj so tam hitrosti vetra največje.

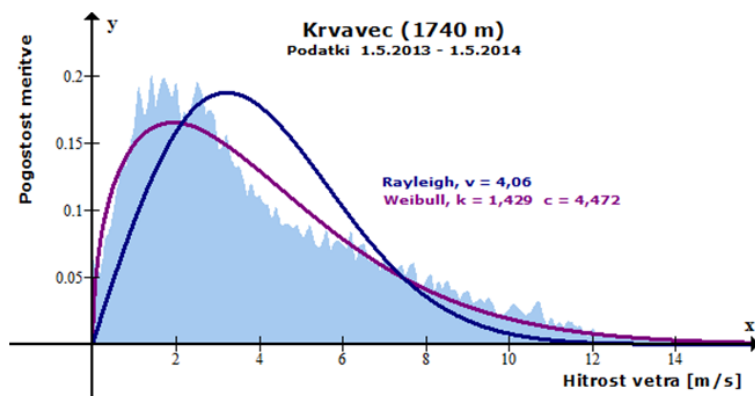
S pomočjo dobljene časovne vrste podatkov lahko narišemo histogram, ga normiramo in primerjamo s porazdelitvijo. Za velikost predala je smiselno vzeti 0.1 m/s, kolikor znaša natančnost meritev, pomembno pa je tudi, da zajamemo dovolj število meritev, da se posamezni vrhovi zgladijo. Parametri vseh nadaljnje prikazanih porazdelitev so določeni po empiričnih približkih, opisanih v prejšnjem poglavju.

Za začetek so prikazani podatki s postaje Rogla, za obdobje 1.5.2012 do 1.5.2014 (skupno 35088 meritev). Povprečna hitrost vetra v tem obdobju je bila 4.38 m/s, njen standardni odklon pa 2.17 m/s. Poleg sta prikazani tudi Rayleighjeva in Weibullova porazdelitev. Parametri porazdelitev so bili določeni z opisanimi empiričnimi približki in ne z metodo najmanjših kvadratov.



Slika 5: Histogram meritev hitrosti za Roglo s pripadajočima porazdelitvama.

Weibullova in Rayleighjeva porazdelitev sta si v tem primeru zelo podobni in se v veliki meri ujemata s podatki. Za podatke s Krvavca, s povprečno hitrostjo vetra 4.06 m/s in njenim standardnim odklonom 2.02 m/s se porazdelitvi med seboj precej bolj razlikujeta, podatkom pa se bolj prilega Weibullova.



Slika 6: Histogram meritev hitrosti za Krvavec s pripadajočima porazdelitvama.

Zgoraj prikazana primera kažeta, da se Rayleighjeva in Weibullova porazdelitev kar dobro ujemata z izmerjenimi podatki in sta vsaj na opisanih lokacijah primerni za grobo oceno možne proizvodnje. Ujemanje je slabše na vremenskih postajah na zelo razgibanem reliefu ali v urbanem okolju

kjer so zaradi zgradb tokovi zraka bolj turbulentni (posamezne komponente hitrosti pa korelirane), a so tam hitrosti vetra ponavadi tako nizke, da izkoriščanje vetrne energije v nobenem primeru ni smotno.

V primeru načrtovanja večjih vetrnih elektrarn je natančna ocena letne proizvodnje ključnega pomena, zato imamo na voljo tudi izmerjene hitrosti v obliki časovne vrste. Takrat lahko namesto analitičnih porazdelitev uporabimo kar direktno časovno integracijo podatkov, saj je taka ocena enostavna in hkrati bolj natančna.

## 6. Ocena možne proizvodnje elektrike na Kredarici

Za potrebe gorske kočice in meteorološke postaje sta na Kredarici na nadmorski višini 2514m postavljeni dve enaki vetrnici, ki s pomočjo akumulatorjev za shrambo energije otočno (neodvisno od el. omrežja) napajata porabnike.



Slika 7: Slika vetrnic na Kredarici. Foto: Elektro energija d.o.o.

Vetrnici z nazivno močjo 5,2 kW se zaženejo pri hitrosti 3.5 m/s, nazivno moč dosežeta pri hitrosti 11 m/s, pri vseh (običajnih) višjih hitrostih vetra pa ohranjata nazivno moč. Vsaka od njih povprečno proizvede 7000 kWh elektrike na leto. Zaradi enostavnosti v nadaljnjem izračunu obravnavamo eno od obeh vetrnic.

### 6.1 Analiza podatkov z vremenske postaje

Podobno, kot že opisano v poglavju o porazdelitvah, lahko na spletni strani ARSO pridobimo podatke o povprečnih polurnih hitrostih vetra na meteorološki postaji Kredarica. Povprečna hitrost za postajo znaša 4.98 m/s, njen standardni odklon pa 3.27 m/s.

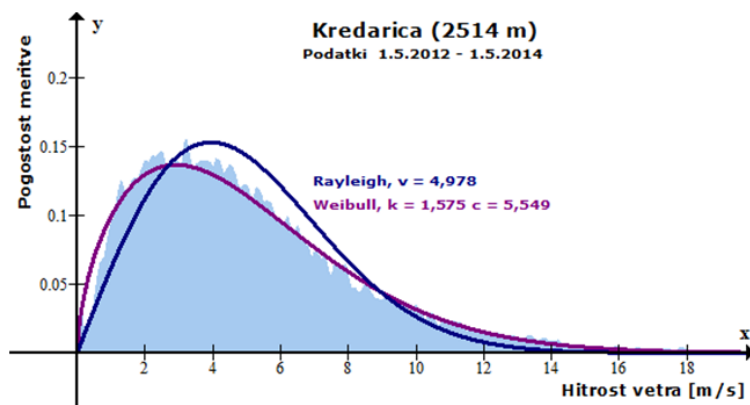
Za prvo oceno možne proizvodnje vetrnice lahko poskusimo kar s povprečno hitrostjo vetra, ki je višja od zagonske hitrosti vetrnice in zato vsaj deloma smiselna. Če ponovno predpostavimo, da je moč vetrnice sorazmerna le  $v^3$ , lahko izračunamo povprečno moč

$$P_{\text{avg}} = P_{\text{max}} \frac{v_{\text{avg}}^3}{v_{\text{max}}^3} = 5.2 \text{ kW} \cdot \frac{4.978^3}{11^3} = 0.38 \text{ kW},$$

s pomočjo le-te pa letno proizvodnjo okoli 4200 kWh. Ocena je zaradi že omenjene razlike v povprečnem kubu in kubu povprečja pričakovano premajhna.



Za obravnavo s pomočjo porazdelitev hitrosti narišemo histogram in s pomočjo omenjenih približkov določimo njene parametre:



Slika 8: Histogram meritev hitrosti za Kredarico s pripadajočima porazdelitvama.

Podatkom se bolje prilega Weibullova porazdelitev, zato poskusimo proizvodnjo določiti z njeno integracijo prek enačbe (5), kjer moramo posebej upoštevati območje konstantne moči za vse hitrosti od 11 m/s naprej

$$P_{\text{avg}} = \frac{1}{v_{\text{max}}^3} \int_{v_{\text{min}}}^{v_{\text{max}}} p(v)v^3 dv = 5.2 \text{ kW} \left[ \int_{3.5}^{11} p(v)v^3 dv + \int_{11}^{\infty} p(v) dv \right] = 0.97 \text{ kW}.$$

S pomočjo te vrednosti lahko izračunamo letno proizvodnjo okoli 8500 kWh.

Ocena s pomočjo integracije Weibullove porazdelitve presega dejansko proizvodnjo za približno 20 %. Razlika bi lahko bila posledica razdalje in višinske razlike med vremensko postajo in vetrnico, zaradi česar ima vetrnica drugačne pogoje, kot so bili upoštevani v izračunu. Hkrati vetrnica ni priključena na omrežje, zato njeno proizvodnjo omejujejo porabniki, pri shrambi in pretvorbi elektrike iz akumulatorjev so prisotne izgube, prav tako pa se vetrnica občasno pokvari in s tem dejanska proizvodnja pade.

Kljub nezanemarljivemu odstopanju obeh vrednosti od dejanske proizvodnje, predstavljata obe oceni interval možne proizvodnje v kateri bi se na koncu morala nahajati dejanska proizvodnja določene vetrnice na izbranem območju.

## 7. Zaključek

V članku sem poskušal predstaviti najsplošnejše fizikalne zakonitosti, ki veljajo kadar želimo pretvarjati energijo vetra v mehansko in nato električno energijo. Zgoraj opisani izračuni in postopki so lahko predvsem osnova za hitro oceno, koliko energije je možno dobiti iz vetra na določenem kraju in ali je lahko tako početje tudi upravičeno.

Velikokrat se v splošni, pa tudi strokovni javnosti pojavljajo špekulacije v zvezi z izkoriščanjem vetrne energije na območjih nizkih hitrosti, ki so nemalokrat zaradi populistične naravnosti celo v nasprotju s preprostimi fizikalnimi zakoni. Nasprotno so lahko v območjih z velikimi hitrostmi vetra danes vetrne elektrarne poleg okoljske sprejemljivosti tudi ekonomsko upravičene in prispevajo pomemben delež k proizvodnji energije iz obnovljivih virov. Ker je globalna moč vetra v primerjavi z našimi potrebami velika, ni pričakovati, da bi se že tako strma rast inštalirane moči vetrnih elektrarn kaj hitro ustavila.

Kljub napredku tehnologije, ostaja fizikalno dejstvo: malo vetra, malo elektrike.

LITERATURA

- [1] J. Rakovec, T. Vrhovec, *Osnove meteorologije za naravoslovce in tehnike*, DMFA Ljubljana (2007), . 92–93.
- [2] J.F. Manwell, J.G. McGowan and A.L. Rogers, University of Massachusetts, Amherst, USA *Wind energy explained, Theory, Design and Application* (John Wiley & Sons LTD, 2003) 8 – 105.
- [3] M. Tuma, M. Sekavčnik *Energetski stroji in naprave, osnove in uporaba* Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo (2005).
- [4] *Global wind report, annual market report (2015)*, ogled 24.8.2016  
[http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2012/06/Annual\\_report\\_2012\\_LowRes.pdf](http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2012/06/Annual_report_2012_LowRes.pdf).
- [5] C.L. Archer, M.Z. Jacobson *Journal of geophysical research*, vol. **110**, D12110.
- [6] Povprečne hitrosti vetra na meteoroloških postajah, ogled 16.5.2014.
- [7] [http://www.wind-power-program.com/turbine\\_characteristics.htm](http://www.wind-power-program.com/turbine_characteristics.htm), ogled 24.8.2016.
- [8] <http://meteo.arso.gov.si/met/sl/app/webmet/>.