

# UTJECAJ PARAMETARA WEIBULLOVE DISTRIBUCIJE NA RADNE PARAMETRE VJETROAGREGATA

---

**Pešut, Sendi Božena**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2021**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Split / Sveučilište u Splitu**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:228:573915>

*Rights / Prava:* [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-06**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of University Department of Professional Studies](#)



UNIVERSITY OF SPLIT





**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE**

Preddiplomski stručni studij Konstrukcijsko strojarstvo

**SENDI BOŽENA PEŠUT**

**Z A V R Š N I R A D**

**UTJECAJ PARAMETARA WEIBULLOVE  
DISTRIBUCIJE NA RADNE PARAMETRE  
VJETROAGREGATA**

Split, rujan 2021.

**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE**

Preddiplomski stručni studij Konstrukcijsko strojarstvo

**Predmet:** Obnovljivi izbori energije

**Z A V R Š N I R A D**

**Kandidat:** Sendi Božena Pešut

**Naslov rada:** Utjecaj parametara Weibullove distribucije na radne  
parametre vjetroagregata

**Mentor:** dr. sc. Zlatko Jankoski, prof. v. š. u trajnom zvanju

**Komentor:** /

Split, rujan 2021.

**REPUBLIKA HRVATSKA**  
**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**Sveučilišni odjel za stručne studije**

**Studij:** Konstrukcijsko strojarstvo  
**Predmet:** Obnovljivi izvor energije  
**Nastavnik:** dr. sc. Zlatko Jankoski, prof. v. š. u trajnom zvanju

## **ZADATAK**

**Kandidat:** Sendi Božena Pešut

**Zadatak:** Utjecaj parametara Weibullove distribucije na radne parametre vjetroagregata

U radu je potrebno:

- Teoretski prikazati i objasniti Weibullovu distribuciju;
- Objasniti praktičnu primjenu Weibullove distribucije pri obradi izmjerenih podataka brzine i trajanja vjetra, te utjecaj parametara Weibullove distribucije njen oblik/karakteristiku;
- Općenito prikazati proces procjene proizvodnje električne energije na osnovi Weibullove distribucije vjetra i krivulje izlazne električne snage vjetroagregata;
- Za odabrani vjetroagregat navesti tehničku specifikaciju i prikazati krivulju izlazne električne snage;
- Odabrati osnovni oblik Weibullove distribucije vjetra, te izraditi početnu procjenu proizvodnje električne energije vjetroagregata;
- Varirati parametre Weibullove distribucije vjetra, obrazložiti efekt variranja parametara Weibullove distribucije vjetra, te izraditi procjene proizvodnje električne energije vjetroagregata za svaku od varijacija;
- Obraditi dobivene rezultate, te ih interpretirati u odnosu na odabrani osnovni oblik Weibullove distribucije vjetra i početnu procjenu proizvodnje električne energije vjetroagregata;
- Iznijeti zaključke;
- Navesti literaturu i izvore podataka.



## Sažetak

U radu je prikazan utjecaj parametra odnosa veličina  $A$  i parametra oblika vjetra  $k$  Weibullove distribucije na radne parametre vjetroagregata, s posebnim naglaskom na očekivanu proizvodnju električne energije. U teoretskom dijelu završnog rada objašnjena je Weibullova distribucija i njena praktična primjena, te utjecaj parametara  $A$  i  $k$  na oblik Weibullove distribucije. Prikazan je teoretski proračun procjene proizvodnje električne energije za odabrani vjetroagregat i pripadajuću krivulju snage. U praktičnom dijelu završnog rada odabran je vjetroagregat i „osnovni“ oblik Weibullove distribucije vjetra, te je za odabrane ulazne vrijednosti izvršena simulacija rada vjetroagregata i izrađena procjena proizvodnje električne energije. Prikazana je analiza radnih parametara vjetroagregata za različite vrijednosti parametara  $A$  i  $k$ , te njihovih kombinacija. Konačno, za sve varijacije parametara Weibullove distribucije vjetra izrađena je usporedna analiza procjene proizvodnje električne energije.

Ključne riječi: Weibullova distribucija, vjetroagregat, proizvodnja električne energije

## Summary (Influence of Parameters of Weibull Distribution on Wind Turbine Operating Parameters)

The paper presents the influence of parameters  $A$  and  $k$  of the Weibull distribution on the operating parameters of wind turbines, with special emphasis on the expected electricity production. In the theoretical part of the final paper, the Weibull distribution and its practical applications are explained, as well as the influence of the parameters  $A$  and  $k$  on the shape of the Weibull distribution. The theoretical calculation of the estimation of electricity production for the selected wind turbine and the corresponding power curve is presented. In the practical part of the final work, the wind turbine and the "basic" form of Weibull wind distribution were selected, and for the selected input values, the wind turbine operation was simulated and an estimate of electricity production was made. The analysis of operating parameters of wind turbines for different values of parameters  $A$  and  $k$ , and their combinations is presented. Finally, for all variations of the Weibull wind distribution parameters, a comparative analysis of the electricity production estimate was made.

Keywords: Weibull distribution, wind turbine, electricity generation

## SADRŽAJ

Sažetak	ii
Summary (Influence of Parametars of Weibull Distribution on Wind Turbine Operating Parameters)	ii
1.	1
1.1.	1
1.2.	3
2.	5
2.1.	6
2.2.	9
3.	12
4.	15
5.	19
5.1.	20
5.1.1.	20
5.1.2.	22
5.2.	23
5.2.1.	23
5.2.2.	25
6.	26
7.	28
7.1.	29
7.2.	30
7.3.	32
8.	32
Literatura	39



**Popis slika**

Slika 1.1.- Weibullova funkcija vjetrojatnosti određene brzine vjetra [3]	2
Slika 1.2.- Weibullova distribucija s različitim parametrima k [5]	3
Slika 1.3.- Weibullova razdioba [6]	4
Slika 1.4.- Weibullova razdioba utjecajem različitih parametara A i k [7]	5
Slika 2.1.- Učinkovitost vjetroturbine [8]	7
Slika 2.2.- Koeficijent $C_p$ s obzirom na $v^2/v_1$ [8]	8
Slika 2.3.- Ruža vjetrova na Jadranu [11]	8
Slika 2.4. Krivulja snage [11]	9
Slika 2.5.- Ovisnost snage vjetrogeneratora o brzini vjetra [12]	10
Slika 2.6.- Ovisnost snage vjetra o brzini [13]	11
Slika 2.7.- Razdioba brzine vjetra i Weibullova razdioba [13]	12
Slika 3.1.- Vjetroagregat Vestas V90 [14]	13
Slika 3.2.- Danska firma Vestas sa sjedištem u Aarhusu [15]	13
Slika 3.3.- Krivulja snage za vjetroagregat Vestas V90- 2 MW [16]	14
Slika 4.1.- Krivulja raspodjele brzine vjetra [17]	19
Slika 4.2.- Weibullova funkcija parametara $A=6,0$ m/s i $k= 2$ [18]	19
Slika 4.3.- Krivulje parametara osnovnog oblika Weibullove distribucije [19]	21
Slika 5.1.- Weibullova funkcija dobivena utjecajem parametara $A= 6$ m/s, $k= 3$ [18]	22
Slika 5.2.- Karakteristične krivulje snage i Weibullove funkcije za $A= 6$ m/s, $k=3$ [19]	23
Slika 5.3.- Weibullova funkcija dobivena utjecajem parametara $A= 6$ m/s, $k=1$ [18]	24
Slika 5.4.-Karakteristične krivulje snage i Weibullove funkcije za $A= 6$ m/s, $k=1$ [19]	25
Slika 5.5.- Weibullova funkcija dobivena utjecajem parametara $A=4$ m/s, $k=2$ [18]	26
Slika 5.6.-Karakteristične krivulje snage i Weibullove funkcije za $A= 4$ m/s, $k=2$ [19]	27
Slika 5.7.- Weibullova funkcija dobivena utjecajem parametara $A= 8$ m/s, $k=2$ [18]	28
Slika 5.8.- Karakteristične krivulje snage i Weibullove funkcije za $A= 8$ m/s, $k=2$ [19]	28
Slika 7.1.- Weibullova funkcija dobivena utjecajem parametara $k=1$ i $A= 8$ m/s [18]	33
Slika 7.2.- Karakteristične krivulje snage i Weibullove funkcije za $A= 8$ m/s, $k= 1$ [19]	34
Slika 7.3.- Weibullova funkcija dobivena utjecajem parametara $k=3$ i $A= 4$ m/s [18]	35
Slika 7.4.- Karakteristične krivulje snage i Weibullove funkcije za $A=4$ m/s, $k=3$ [19]	35

**Popis tablica**

Tablica 3.1.- Tehnički podatci snage VA	14
Tablica 3.2.- Tehnički podatci o rotoru VA	14
Tablica 3.3.- Tehnički podatci generatora VA	15
Tablica 3.4.- Tehnički podatci tornja VA	15
Tablica 3.5.- Tehnički podatci težine za pojedinačne dijelove VA	15
Tablica 4.1.- Raspodjela brzine vjetra	17
Tablica 4.2.- Rezultati parametara osnovnog oblika Weibull distribucije	20
Tablica 5.1.- Radni parametri vjetroagregata za $A=6$ m/s, $k=3$	23
Tablica 5.2.- Radni parametri vjetroagregata za $A=6$ m/s, $k=1$	25
Tablica 5.3.- Radni parametri vjetroagregata za $A=4$ m/s, $k=2$	27
Tablica 5.4.- Radni parametri vjetroagregata za $A=8$ m/s, $k=2$	29
Tablica 6.1.- Rezultati osnovnog Weibullovog oblika $k=2$ i varijacije parametra $k$	30
Tablica 6.2.- Usporedba brzine vjetra osnovnog oblika $k=2$ i varijacije parametra $k$	31
Tablica 6.3.- Rezultati osnovnog Weibullovog oblika $A=6$ m/s i varijacije parametra $A$	31
Tablica 6.4.- Usporedba brzine vjetra osnovnog oblika $A=6$ m/s i varijacija parametra $A$	32
Tablica 7.1.- Radni parametri vjetroagregata za $A=8$ m/s, $k=1$	34
Tablica 7.2.- Radni parametri vjetroagregata za $A=4$ m/s, $k=3$	36
Tablica 7.3.- Usporedba rezultata varijacije parametara $A$ i $k$	36

## 1. Uvod

U ovom završnom radu izvršiti će se analiza procijenjene proizvodnje električne energije iz vjetroagregata na osnovu definiranog oblika Weibullove distribucije vjetra. Za potrebe analize parametri Weibullove distribucije će se varirati u odnosu na odabrani „osnovni“ ili početni oblik Weibullove distribucije. Promjena parametara Weibullove distribucije, svaki parametar pojedinačno ili njihove kombinacije, demonstrirati će njihov utjecaj na proizvodnju električne energije iz vjetroagregata.

### 1.1. Weibullova distribucija

Weibullova distribucija je kontinuirana raspodjela vjerojatnosti. Ime je dobila po švedskom matematičaru Waloddiju Weibullu.

Sezonske i godišnje varijacije brzine vjetra na određenom mjestu mogu se najbolje opisati funkcijama distribucije.

Stewart i Essenwanger pokazali su da Weibullova funkcija distribucije daje dobru analitičku aproksimaciju za frekvencijsku raspodjelu brzine vjetra blizu površine tla.

Funkcija gustoće vjerojatnosti brzina vjetra, najbolje se može aproksimirati s Weibullovom funkcijom raspodjele vjerojatnosti. Weibullova razdioba gustoće vjerojatnosti  $f(v)$  određena je s dva parametra: parametrom oblika  $k$  i parametrom mjere  $A$ . Vjerojatnost da vjetar ima brzinu  $v$  u nekom vremenskom intervalu može se izračunati prema izrazu preuzetom iz literature [2]:

$$F(v) = \left(\frac{k}{A}\right) \left(\frac{v}{A}\right)^{(k-1)} \cdot e^{-\left(\frac{v}{A}\right)^k}; \quad (1.1)$$

$$k, A > 0, 0 < v < \infty$$

$v$  - brzina vjetra

$k$  - parametar oblika vjetra

$A$  - parametar odnosa veličine (mjere)  $\left[\frac{m}{s}\right]$

$F(v)$  - frekvencija događanja (vjerojatnosti) određene brzine vjetra

Kumulativna Weibullova funkcija distribucije predočena je s izrazom preuzetim iz literature [2]:

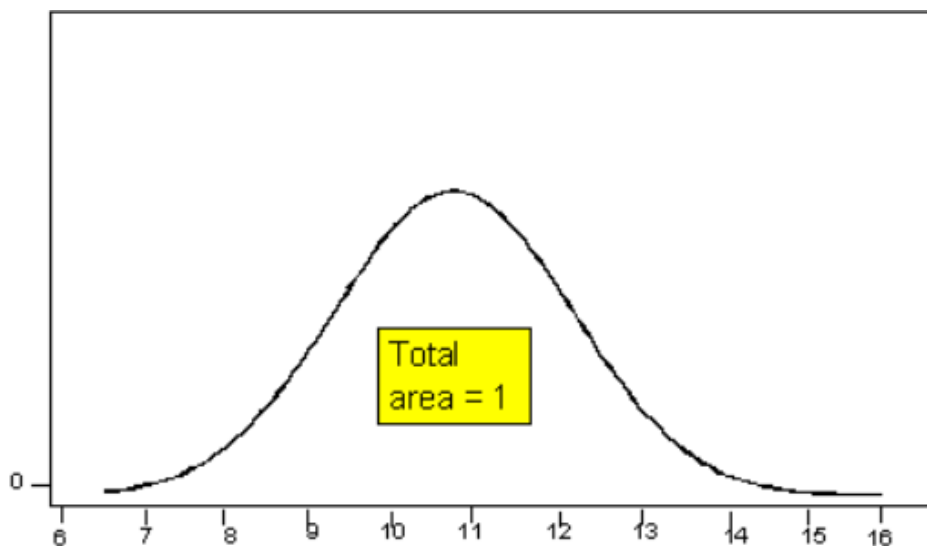
$$F(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{A}\right)^k} \quad (1.2)$$

Prema definiciji funkcije vjerojatnosti, vjerojatnost da će vjetar imati brzinu između nule i beskonačnosti jednaka je jedinici, tj. površina ispod krivulje funkcije razdiobe jednaka je 1:

$$\int_0^{\infty} F(v) \cdot dv = 1 \quad (1.3)$$

Weibullova distribucija zahtijeva parametar oblika te parametar skaliranja kako bi se dobila funkcija gustoće.

Histogramom se prikazuju vjerojatnosti pojava brzine vjetra u nekom razdoblju.



Slika 1.1.- Weibullova funkcija vjerojatnosti određene brzine vjetra [3]

Na Slici 1.1. može se vidjeti ukupna površina ispod krivulje gustoće koja je jednaka 1, a krivulja predstavlja vjerojatnosti po površini.

Površina ispod krivulje do i uključujući određenu točku jednaka je površini do i isključujući točku jer ne postoji područje nad jednom točkom. Postoji beskonačno mnogo mogućih vrijednosti za kontinuiranu varijablu pa je tehnički vjerojatnost da se dogodi bilo koja

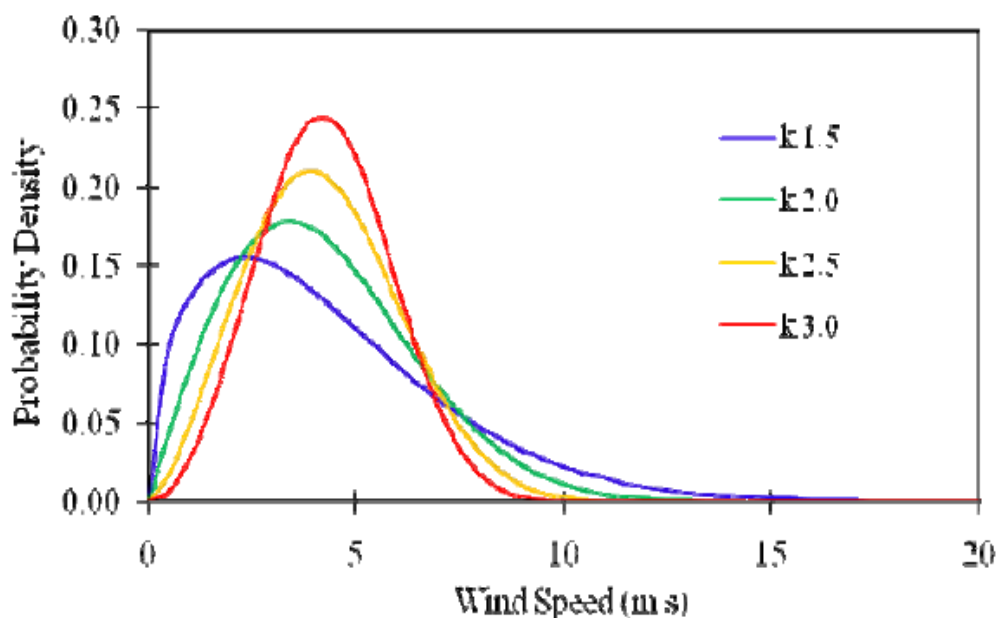
pojedinačna vrijednost jednaka nuli. Zato ukupna površina pod bilo kojom krivuljom gustoće vjerojatnosti mora biti jednaka 1.

## 1.2. Primjena Weibullove distribucije i njezini parametri

Weibullova distribucija je teorija životnog vijeka, odnosno matematički izraz koji se koristi u širokoj primjeni pa tako i u smislu obrade izmjerenih vrijednosti vjetra. Koristi se u analizi pouzdanosti i održavanja. Točnije, u opisivaju slučajnog vijeka trajanja nekog elementa kao što su otpornici, žarulje i slično, u teoriji pouzdanosti te u biologiji, kemiji, medicini, šumarstvu i inženjerskim istraživanjima. Ovisno o vrijednostima parametara može se koristiti za modeliranje različitih životnih ponašanja.

Kako izvor vjetra varira ovisno o godišnjem dobu, o danu, i slično, potrebno je dobiti prikladne vrijednosti za parametar oblika i parametre razmjera Weibullove distribucije, koji su važni zbog odabira mjesta ugradnje generatora vjetroagregata.

Weibullov parametar oblika,  $k$ , poprima vrijednosti između 1 i 3. Promjenjivi vjetrovi označeni su malom vrijednosti parametra  $k$ , odnosno imaju veće odstupanje od srednje brzine vjetra, dok su konstantni vjetrovi označeni višom vrijednošću parametra  $k$ .



Slika 1.2.- Weibullova distribucija s različitim parametrima  $k$  [5]

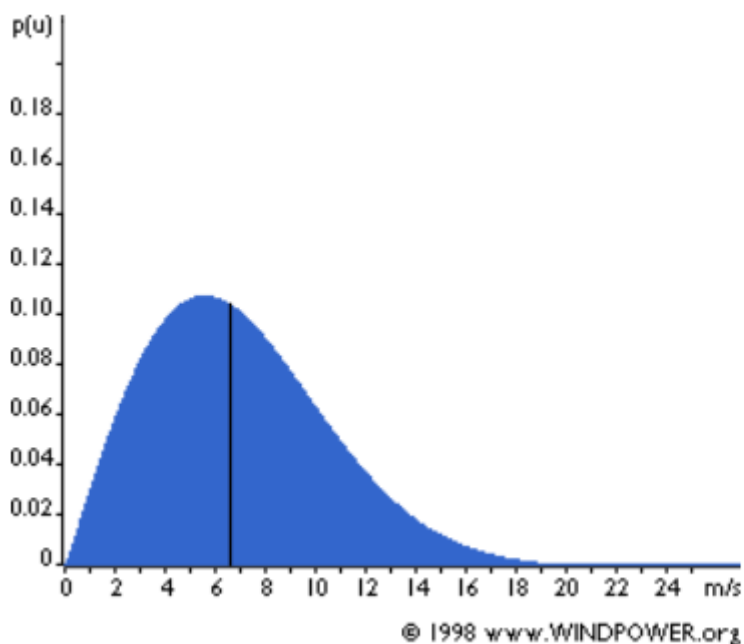
Na *Slici 1.2.* prikazane su Weibullove distribucije s jednakom prosječnom brzinom vjetra i različitim vrijednostima parametra  $k$ , kako bi se vidjela razlika odnosa parametra i raspodjele brzine vjetra.

Parametar  $A$  mjeri se u m/s, te pokazuje karakterističnu brzinu vjetra distribucije. Parametar  $A$  je proporcionalan srednjoj brzini vjetra.

Promjena vjerojatnosti i pojava određenog područja brzine mijenja izgled Weibullove razdiobe te vrijednosti tri karakteristična parametra Weibullove distribucije ( $k$ ,  $A$  i srednja brzina vjetra). Frekvencija izražena u % proizlazi iz višegodišnjih mjerenja, gdje svako područje brzine ima vjerojatnost pojave određenog postotka brzine tijekom godine.

Pri projektiranju vjetroelektrane treba uzeti u obzir sve aspekte koji utječu na isplativost projekta, od investicijskih troškova do godišnje ukupne proizvodnje električne energije.

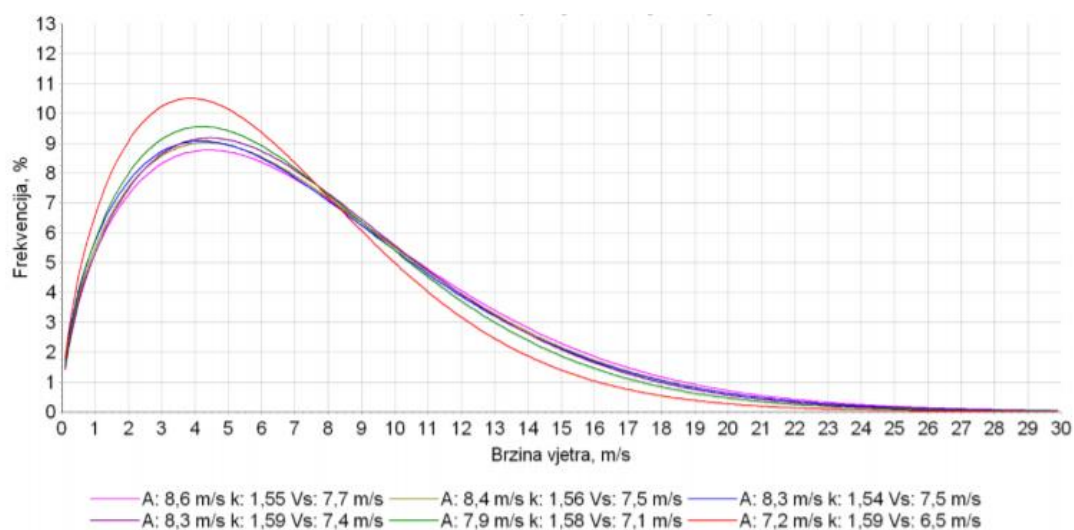
Najveći utjecaj na proizvodnju električne energije ima brzina vjetra i njena učestalost tijekom vremena. Idealno bi bilo da vjetar puše svaki dan istom brzinom što je nerealno. Kako je vjetar promjenjiv po intenzitetu, trajanju i smjeru, potrebno je dužim praćenjem i mjerenjem vjetra izvršiti prikladnu analizu podataka pomoću kojih se može izvršiti procjena da li je odabrana lokacija sa svojim vjetropotencijalom pogodna za izgradnju vjetroelektrane. Upravo se pomoću Weibullove razdiobe mogu najbolje aproksimirati podaci te na taj način dobiti vjerojatnost pojavljivanja određene brzine vjetra.



*Slika 1.3.- Weibullova razdioba [6]*

Weibullovom razdiobom aproksimiraju se podaci pri određenoj visini, u ovom slučaju na visini od 10 m kao što se vidi na *Slici 1.3*. Parametar  $A$ , koji je proporcionalan srednjoj brzini vjetra i koristi se za označavanje prosječnog vjetrovitog područja, postavljen je na 7 m/s.

Drugi bitan parametar je parametar oblika  $k$ , koji je postavljen na vrijednost 2. Okomita linija koja se nalazi na sredini funkcije dijeli površinu na 2 jednaka dijela te time označava srednju točku distribucije, odnosno njezin medijan.



Slika 1.4.- Weibullova razdioba utjecajem različitih parametara  $A$  i  $k$  [7]

Funkcija Weibullove razdiobe proizlazi iz određene frekvencije vjetra u odnosu na brzinu vjetra, kao što se može vidjeti na *Slici 1.4*. Kako bi se prikazala razlika razdiobe definirani su različiti parametri  $A$ , koji označava koeficijent skaliranja, te parametar  $k$ , koji definira oblik krivulje.

Parametar  $k$  označava koliko je distribucija vrhunaska, odnosno, ako je parametar  $k$  visok, visoka je i stabilnost vjetra. Uz parametre  $A$  i  $k$ , prikazana je i srednja vrijednost brzine vjetra označena kao  $V_s$ . Vidljivo je da u slučaju visokog parametra  $A$ , povećava se i srednja brzina vjetra  $V_s$ .

## 2. Procjena proizvodnje električne energije

### 2.1. Pretvorba energije vjetra

Električna energija dobiva se pomoću rotirajućeg stroja, tj. vjetroagregata na način da kinetičku energiju kojom se rotor vjetroagregata pokreće, pretvara u mehaničku, a zatim preko električnog generatora pretvara mehaničku energiju u električnu.

Glavni čimbenici koji utječu na količinu proizvodnje električne energije vjetroagregata su brzina vjetra, promjer lopatica i gustoća zraka.

Kako gustoća snage vjetra ovisi o srednjoj brzini vjetra i raspodijeli brzine vjetra, za izradu procjene proizvodnje električne energije iz vjetra potrebno je sagledati navedene važne karakteristike. S obzirom na to da se vjetroelektrana sastoji od više vjetroagregata potrebno je sagledati svaki agregat zasebno, budući da vjetar ne puše svugdje jednako (utjecaj mikrolokacije). Na jednoj lokaciji srednja brzina vjetra može biti konstantna, dok na drugoj lokaciji vjetar može puhati različitim brzinama u određenom vremenu. U takvoj situaciji, na prvoj lokaciji može biti nekoliko puta manje ili više proizvedene električne energije u odnosu na drugu lokaciju. Weibullovom krivuljom može se prikazati realna raspodjela brzine vjetra.

Količina kinetičke energije koja se kreće prema lopaticama rotora vjetroagregata ovisi o gustoći zraka, a na koju utječu temperatura zraka, atmosferski tlak i vlažnost zraka. Pri standardnim uvjetima (atmosferski tlak) i temperaturi od 15°C, gustoća zraka iznosi  $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ .

Snaga vjetra ovisi o trećoj potenciji brzine vjetra, površini koju opisuje rotor vjetroagregata, te ovisi o temperaturi, odnosno gustoći zraka. Porast snage vjetra uz porast brzine naziva se eksponencijalna ovisnost.

Energija vjetra, odnosno kinetička energija, je ona koja pokreće vjetroagregat, a može se dobiti prema izrazu preuzetim iz literature [8]:

$$E_k = \frac{m \cdot v^2}{2} \quad (2.1)$$

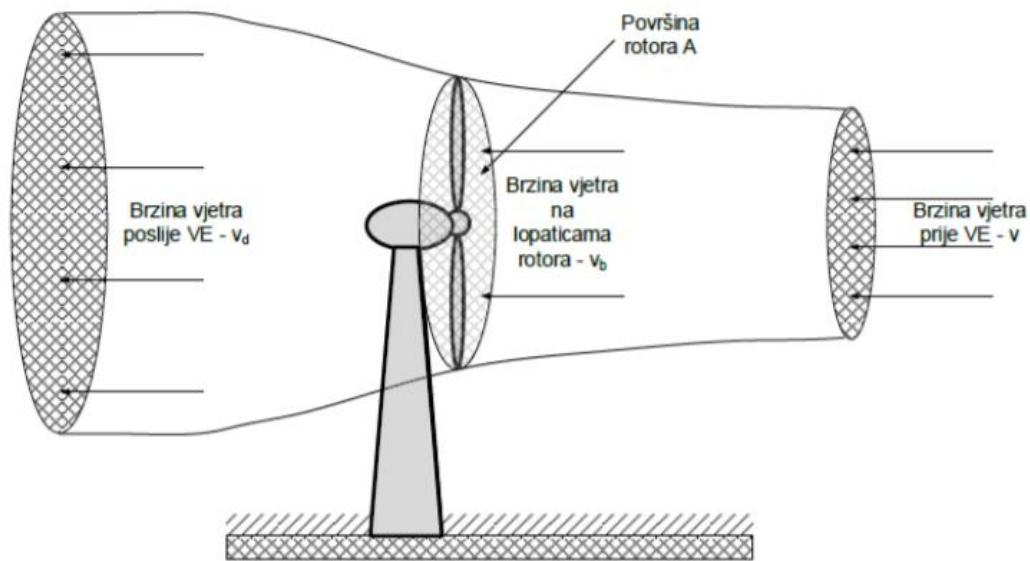
Masa zraka je određena gustoćom  $\rho$ , površinom  $A$  kroz koju struji zrak, brzinom strujanja zraka  $v$ , te vremenom  $t$ :



$$m = \rho \cdot A \cdot v \cdot t \quad (2.2)$$

Raspoloživa snaga vjetra dobivena je derivacijom kinetičke energije po vremenu, te je dana izrazom:

$$P_{vjetra} = \frac{\rho \cdot A \cdot v^3}{2} \quad (2.3)$$



Slika 2.1.- Učinkovitost vjetroturbine [8]

Na Slici 2.1. može se vidjeti kako zrak struji do lopatica rotora vjetroturbine brzinom  $v$ , te zbog nastalih promjena u zraku usporava do brzine  $v_b$  kada dosegne lopatice rotora. Rotor preuzima dio energije, a ostatak energije struji sporije prema izlazu brzinom  $v_d$ . Snaga koju preuzima vjetroatregat uvijek je manja od snage vjetra, jer se sva kinetička energija ne može iskoristiti zbog daljnjeg strujanja zraka, koje je potrebno da bi se napravilo mjesta za kontinuirani dotok novog zraka koji nastružava na lopatice vjetroturbine, tzv. Betzov zakon.

Betzova granica je najveća granica aerodinamičke pretvorbe energije koja iznosi 59,3 %, što znači da je to maksimalna moguća učinkovitost vjetroturbina.

Snaga dobivena iz vjetra ovisi o brzini kojom vjetar dolazi  $v$  i brzini kojom vjetar odlazi  $v_d$ , te se može dobiti prema izrazu preuzetom iz literature [8, 9]:

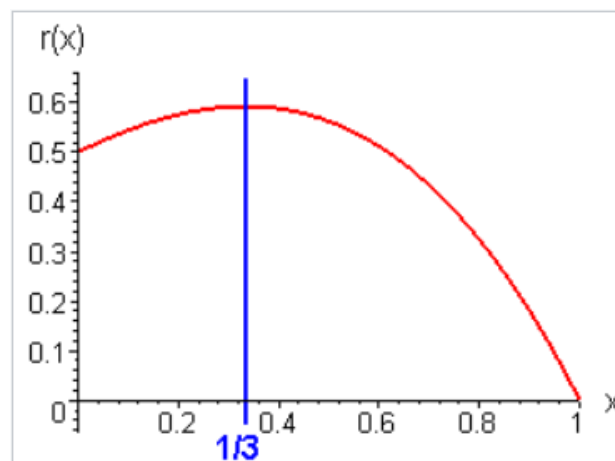
$$P = \frac{\rho \cdot A}{2} \cdot \frac{(v + v_d)}{2} \cdot (v^2 - v_d^2) = \frac{\rho \cdot A}{2} \cdot v^3 \cdot \frac{(1 + x)}{2} \cdot (1 - x^2) \quad (2.4)$$

$$C_p = \frac{(1 + x)}{2} \cdot (1 - x^2) \quad (2.5)$$

$$P = \frac{\rho \cdot A}{2} \cdot v^3 \cdot C_p \quad (2.6)$$

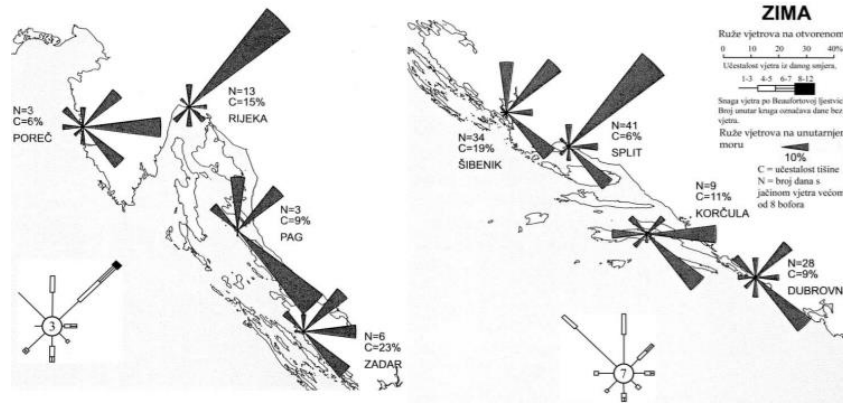
$C_p$  - stupanj aerodinamičke pretvorbe

Iz *Slike 2.2.* može se vidjeti da stupanj aerodinamičke pretvorbe ima maksimalnu vrijednost  $C_{pmax} = \frac{16}{27} = 0,593$  ili 59,3 % što znači da stvarni  $C_p$  ne može biti veći od 59,3 %. U praksi  $C_p$  se uglavnom kreće od 0,35 do 0,40, a kod nekih izvedbi vjetroturbina ide sve do 0,50.



*Slika 2.2.- Koeficijent  $C_p$  s obzirom na  $v_2/v_1$  [8]*

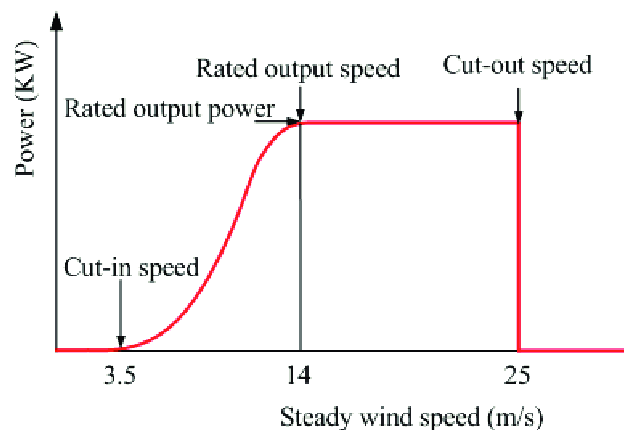
Na količinu proizvodnje energije iz vjetra također utječe i površina lopatica vjetroturbine, a smjer i brzina vjetra mogu se dobiti pomoću uređaja koji se postavlja na mjestu mjerenja (anemometar i vjetrulja), te grafičkog prikaza smjera i jačine puhanja vjetra, tzv. ruže vjetrova. Na *Slici 2.3.* prikazana je ruža vjetrova koja prikazuje smjer i učestalost vjetra iz 12 različitih smjerova.



Slika 2.3.- Ruža vjetrova na Jadranu [11]

## 2.2. Snaga vjetroturbine

Sva energija vjetra, koja dođe do vjetroagregata ne može se u potpunosti iskoristiti, jer vjetroturbina iskrivljuje putanju vjetra prije nego li dođe do rotora. Porastom brzine vjetra izlazna snaga se povećava. Na Slici 2.4. prikazana je krivulja snage jednog vjetroagregata koju svaki proizvođač izrađuje mjerenjem proizvedene snage u ovisnosti o brzini vjetra. Na slici se mogu vidjeti tri karakteristične brzine, kao što su brzina uključivanja, nazivna brzina i brzina isključivanja. Proizvodnja električne energije započinje okretanjem lopatica pri brzini vjetra od 3,5 m/s (eng. cut-in speed). Kako brzina vjetra raste tako raste i proizvodnja energije, a to područje na grafu (između brzine uključivanja i nazivne brzine) predstavlja područje promjenjive snage. Kada brzina vjetra dosegne vrijednost nazivne brzine, vjetroagregat će raditi pri nazivnoj snazi, koja će biti konstantna unatoč povećanju brzine strujanja vjetra. Brzina isključivanja (eng. cut-out speed) obično iznosi između 25 - 30 m/s, kada dolazi do zaustavljanja rada vjetroagregata iz sigurnosnih razloga.



Slika 2.4. Krivulja snage [11]

Procjena godišnje proizvodnje električne energije može se izračunati prema izrazu preuzetom iz literature [8]:

$$W_{god.} = \int_{cut-in}^{cut-out} T_{god} \cdot r \cdot P(v) \cdot f(v) \cdot dv \quad (2.7)$$

*Cut - in speed* - početna brzina vjetra pri kojoj započinje proizvodnja električne energije

*Cut - out speed* - maksimalna brzina vjetra pri kojoj se vjetroagregat zaustavlja

$$T_{god} = 365 \cdot 24 = 8760 \text{ h/god}$$

*r* - raspoloživost vjetroagregata tijekom godine (0,9 ili više)

*P(v)* - snaga vjetroagregata pri brzini *v* (na osnovu dijagrama snage proizvođača VA)

*f(v)* - funkcija gustoće vjerojatnosti pojavljivanja brzine *v* (dobiveno mjerenjem)

U izračun navedenog izraza potrebno je uključiti i koeficijente  $C_H$  i  $C_T$ , koji označavaju utjecaj promjene tlaka i temperature.

Diskretna raspodjela frekvencije brzine vjetra može se izračunati prema izrazu preuzetom iz literature [8]:

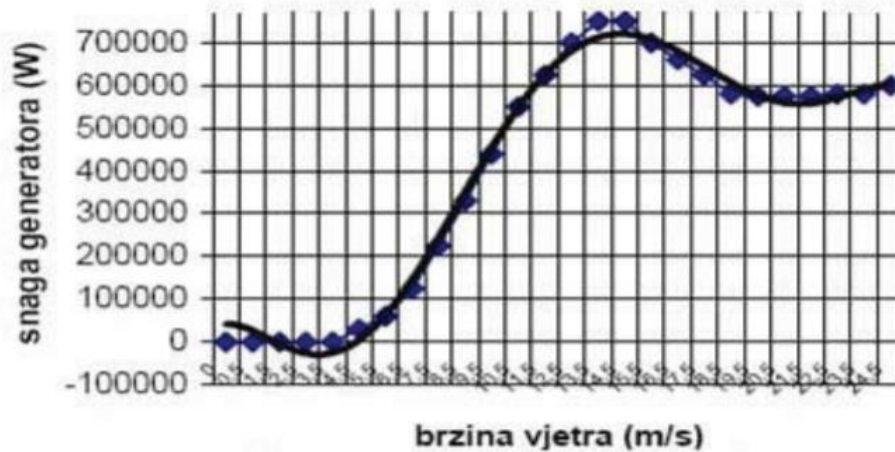
$$W_{god.} = 8760 \cdot r \cdot \sum_{v_i=v_p}^{v_m} P_i \cdot f_i \quad (2.8)$$

$$W_{god.} = r \cdot \sum_{v_i=v_p}^{v_m} P_i \cdot t_i$$

$f_i$  - frekvencija brzine vjetra  $v_i$

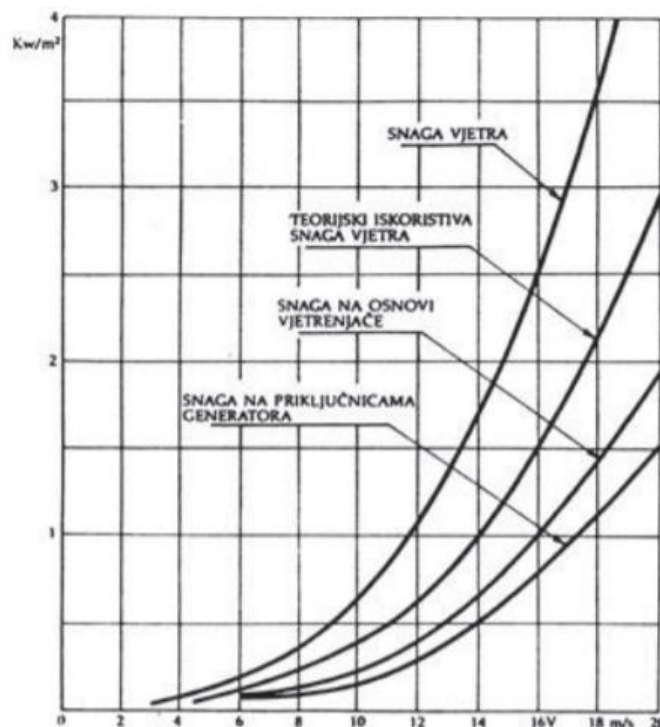
$t_i$  -trajanje brzine vjetra  $v_i$

Primjenom većeg broja diskretnih koraka postiže se veća preciznost proračuna.



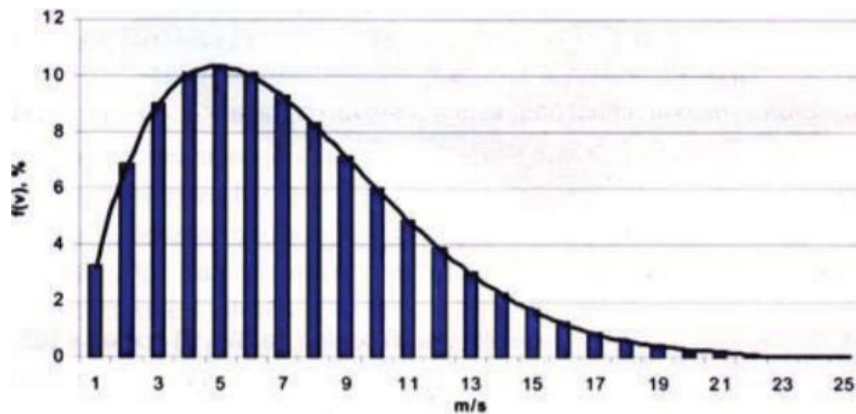
Slika 2.5.- Ovisnost snage vjetrogeneratora o brzini vjetra [12]

Na Slici 2.5. prikazan je primjer krivulje snage vjetroagregata, odnosno, ovisnost snage vjetroagregata o brzini strujanja vjetra. Brzina uključenja postiže se pri 3,5 m/s, dok brzina isključenja pri brzini od oko 25 m/s. Na Slici 2.6 prikazano je koliko se specifične snage vjetra ( $\text{kW}/\text{m}^2$ ) može iskoristiti za proizvodnju električne energije, a u ovisnosti o brzini vjetra. Uslijed fizikalnih ograničenja i višestruke transformacije energije, od slobodne struje zraka do priključaka na generatoru, proizlazi da se oko 35 % energije vjetra može pretvoriti u električnu energiju.



Slika 2.6.- Ovisnost snage vjetra o brzini [13]

Na *Slici 2.7.* može se vidjeti Weibullova razdioba koja označava razdiobu brzine vjetra koja se opisuje matematički, a dobiva se mjerenjem na određenom području. Kako bi se odredila godišnja proizvodnja električne energije potrebno je poznavati očekivanu razdiobu brzine vjetra i krivulju ovisnosti snage vjetroagregata koji se nalazi na određenoj mikrolokaciji. Procjene moguće godišnje proizvodnje energije izvode se pri projektiranju vjetroelektrane.



*Slika 2.7.- Razdioba brzine vjetra i Weibullova razdioba [13]*

### 3. Vjetroagregat

Za potrebe analize proizvodnje električne energije u ovisnosti o vrijednostima parametara Weibullove distribucije, potrebno je odabrati reprezentativni vjetroagregat s pripadajućom krivuljom snage. Među mnogobrojnim modelima vjetroagregata odabran je vjetroagregat proizvođača Vestas, model V90, nazivne snage 2 MW (Slika 3.1).



*Slika 3.1.- Vjetroagregat Vestas V90 [14]*

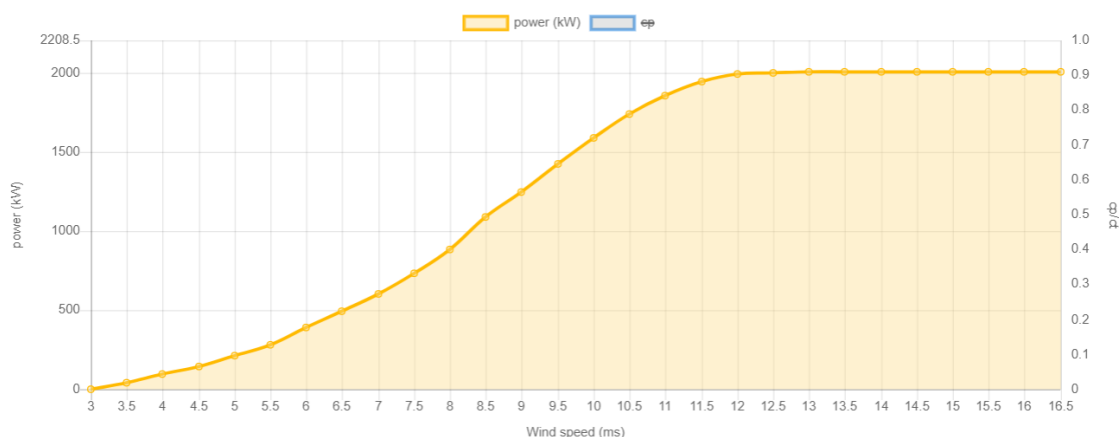
Vestas je Danska firma (Slika 3.2.) sa sjedištem u Aarhusu, osnovana 1945. godine, koja proizvodi i prodaje kopnene vjetroagregate koji se koriste za proizvodnju električne energije. Osim toga, najveći je svjetski serviser vjetroagregata i održava više od 42.000 vjetroturbina, ukupne snage 87.000 GW [15].



*Slika 3.2.- Danska firma Vestas sa sjedištem u Aarhusu [15]*

Stup odabranog vjetroagregata V90 konusne je konstrukcije i izrađen od čelika. Unutar stupa je instalirano dizalo i sigurnosne stepenice s pripadajućim platformama za pristup do gondole. Visina stupa iznosi 80 m. Krivulja izlazne električne snage u ovisnosti o brzini vjetra vidljiva je na *Slici 3.3.*

Power curve



*Slika 3.3.- Krivulja snage za vjetroagregat Vestas V90- 2 MW [16]*

Tehnička specifikacija vjetroagregata Vestas V90 - 2 MW preuzeta je iz literature [16].

*Tablica 3.1.- Tehnički pogonski podatci VA*

POGONSKI PODACI	
Nazivna snaga	2,00 MW
Brzina uključivanja	3,0 m/s
Nominalna brzina vjetra	13,0 m/s
Brzina isključivanja	25,0 m/s

*Tablica 3.2.- Tehnički podatci o rotoru VA*

ROTOR	
Promjer	90 m
Broj lopatica	3
Maksimalna brzina vrtnje	14,9 okr/min
Brzina vrtnje	70 m/s
Materijal	Fiberglas/karbon

*Tablica 3.3.- Tehnički podatci generatora VA*

GENERATOR	
Vrsta	asinkroni
Maksimalna brzina	2.016 okr/min
Napon	690 V
Mrežni priključak	OptiSpeed
Frekvencija	50 Hz



Tablica 3.4.- Tehnički podatci tornja VA

TORANJ	
Visina	80 / 95 / 105 m
Vrsta	Čelik
Oblik	Koničan

Tablica 3.5.- Tehnički podatci težine za pojedinačne dijelove VA

TEŽINA	
Lopatica	6,7 t
Rotor	36 t
Gondola	68 t
Toranj	224 t
Ukupna težina	328 t

#### Rad vjetroagregata:

Prema podacima iz Tablice 3.1. vidljivo je da vjetroagregat započinje s proizvodnjom električne energije pri brzini vjetra od 3 m/s. Kada generator postigne postavljene uvjete, ukopčava se na energetska mrežu. Vjetroagregat proizvodi električnu energiju pri brzinama vjetra od 3 do 25 m/s. Pri brzinama vjetra većim od 25 m/s, vjetrogenerator se zbog sigurnosnih razloga zaustavlja i isključuje s mreže.

## 4. Osnovni oblik Weibullove distribucije vjetra

Kako bi se izvršila analiza utjecaja parametara  $k$  i  $A$  Weibullove distribucije potrebno je odabrati polazni ili osnovni oblik Weibullove distribucije, u odnosu na koju će se uspoređivati utjecaj izmjene parametara  $k$  i  $A$  na proizvodnju električne energije.

Procjena godišnje proizvodnje električne energije računati će se pomoću „on-line“ kalkulatora „Power Calculator“ [19].

Vremenska krivulja određuje broj sati u godini kada vjetar prijelazi brzinu koja nije pogodna za rad vjetroagregata, pri čemu dolazi do prestanka rada iz sigurnosnih razloga. Krivulja je rezultat produkta kumulativne funkcije oblika Weibullove distribucije i broja sati u godini. Važan faktor u određivanju područja na kojem je postavljen vjetroagregat je faktor oblika. Manji faktor oblika predstavlja veći raspon brzina vjetra.

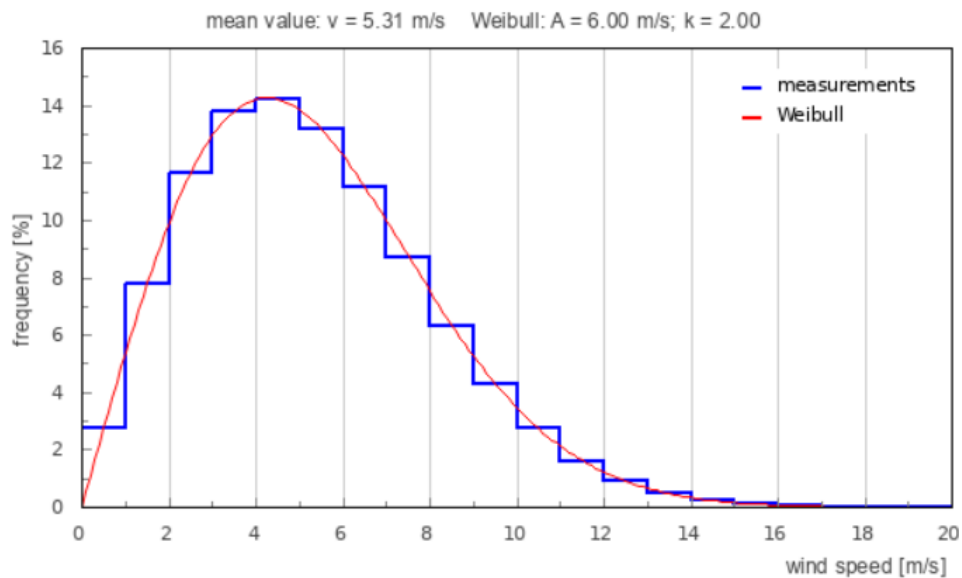
U nastavku su prikazani podaci odabranog polaznog ili osnovnog oblika Weibullove distribucije vjetra. Kako bi se iz odabranih vrijednosti generirao izgled Weibullove distribucije i definirale vrijednosti parametara  $k$  i  $A$  korišten je „on-line“ kalkulator „Weibull Calculator“ [17].

Tablica 4.1.- Raspodjela brzine vjetra

Vrijednosti izmjerenih brzina vjetra (m/s)	Raspodjela brzine vjetra (%)
0 – 1 m/s	2,75
1 – 2 m/s	7,80
2 – 3 m/s	11,64
3 – 4 m/s	13,79
4 – 5 m/s	14,20
5 – 6 m/s	13,15
6 – 7 m/s	11,14
7 – 8 m/s	8,72
8 – 9 m/s	6,34
9 – 10 m/s	4,30
10 – 11 m/s	2,73
11 – 12 m/s	1,62
12 – 13 m/s	0,91
13 – 14 m/s	0,48
14 – 15 m/s	0,24
15 – 16 m/s	0,11
16 – 17 m/s	0,05

17 – 18 m/s	0,02
18 – 19 m/s	0,01
19 – 20 m/s	0,00
Suma	100,00

Prema *Tablici 4.1.* raspodjela brzine vjetra dobivena korištenjem izmjerenih podataka dobar je pokazatelj učestalosti pojavljivanja različitih vjetrova na određenom mjestu. Procjena potencijalne proizvodnje električne energije za određenu vjetroturbinu na određenom mjestu može se dobiti na način da se raspodjela brzine vjetra koristi zajedno s krivuljom snage vjetroagregata.



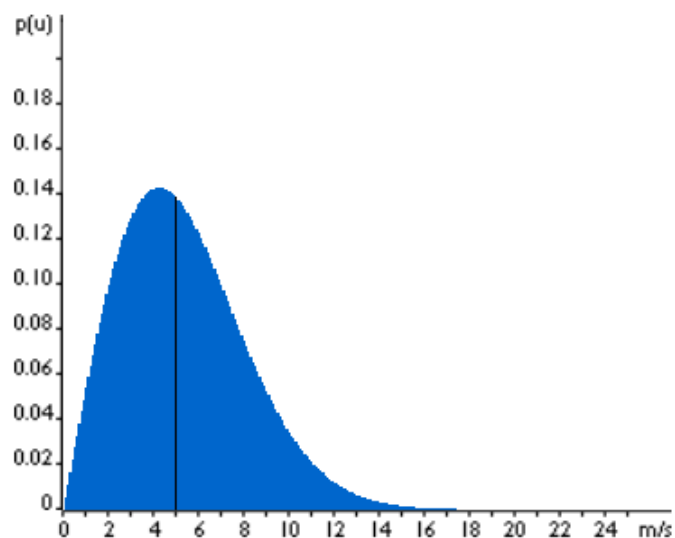
*Slika 4.1.- Krivulja raspodjele brzine vjetra [17]*

Na *Slici 4.1.* može se vidjeti odabir sljedećih parametara, a koji su rezultat obrade podataka iz *Tablice 4.1* koristeći „on-line“ kalkulator „Weibull Calculator“ [17]:

$$v = 5,3 \text{ m/s};$$

$$A = 6,0 \text{ m/s};$$

$$k = 2,0$$



Slika 4.2.- Weibulova funkcija parametara  $A=6,0$  m/s i  $k= 2$  [18]

Prema postavljenim parametrima u „on-line“ kalkulatoru „Weibull Distribution Plotter Programme“ [18], dobivena je Weibulova funkcija što se može vidjeti na Slici 4.2., gdje je okomitom crtom prikazan medijan funkcije, tj. njezina srednja vrijednost.

Iz navedenih parametara može se zaključiti da se radi o konstantnom vjetru s obzirom na to da je postavljen faktor oblika  $k=2$ .

Tablica 4.2.- Rezultati parametara osnovnog oblika Weibull distribucije

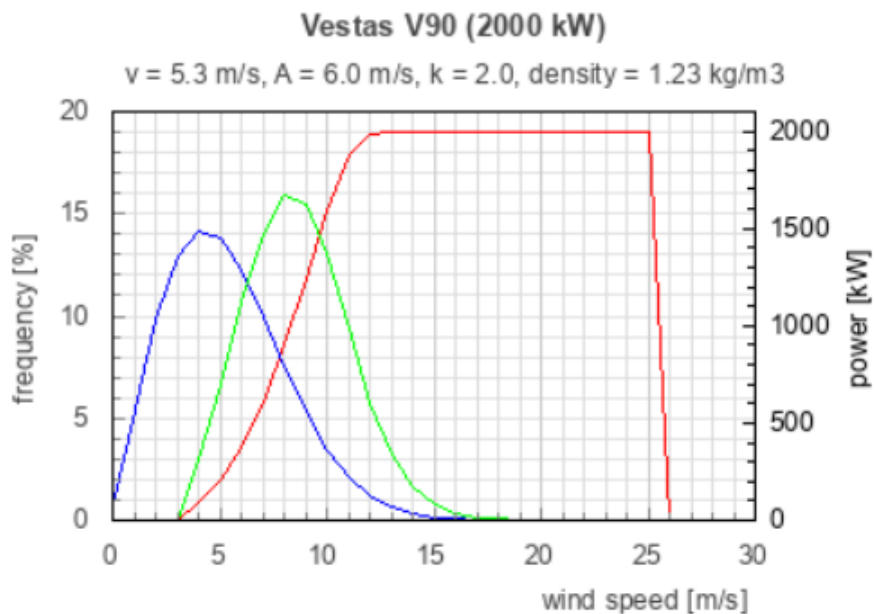
manufacturer	Vestas
Type	V90
Installed capacity	2,000 kW
Rotor diameter	90 m
Energy yield	3,729,766 kWh / year
<sup>1</sup> Capacity factor	21.3%
<sup>2</sup> Full load hours	1,864 h / year
<sup>3</sup> Operating hours	6'233 h / year

U *Tablici 4.2.* prikazani su podaci dobiveni korištenjem „Power Calculator-a“ [19] za osnovni oblik Weibullove distribucije iz kojih proizlazi godišnja proizvodnja električne energije od 3.729.666 kWh/god.

Faktor kapaciteta iznosi 21,3 %, što označava količnik između godišnje proizvodnje i tehnički moguće maksimalne proizvodnje vjetroagregata. Vjetroagregati su projektirani za proizvodnju što veće količine električne energije pri određenim brzinama vjetra. Faktori kapaciteta između 30 - 40% smatraju se visokim vrijednostima, i najčešće se postižu na obalnim područjima.

Puni sati opterećenja odgovaraju faktoru kapaciteta koji se množi s brojem sati godišnje (8760 h). Navedeni vjetroagregat radi pri punom opterećenju 1.864 h/god, što označava teoretski broj sati koji će vjetroagregat raditi pri nazivnoj snazi od 2 MW.

Radni sati pokazuju očekivani broj sati u godini u kojima će vjetroturbina proizvoditi električnu energiju s obzirom na Weibullovu razdiobu raspoloživosti vjetra, što iznosi 6.233 h/god.



*Slika 4.3.- Krivulje parametara osnovnog oblika Weibullove distribucije [19]*

Na *Slici 4.3.* može se vidjeti crvena krivulja koja predstavlja krivulju snage odabranog vjetroagregata Vestas V90 od 2 MW koja je definirana od strane proizvođača vjetroagregata. Plava krivulja prikazuje Weibullovu distribuciju za odabrane parametre  $k$  i  $A$ , dok zelena krivulja označava proizvodnju snage koja je rezultat Weibullove distribucije i krivulje snage.

## 5. Varijacija parametara Weibullove distribucije

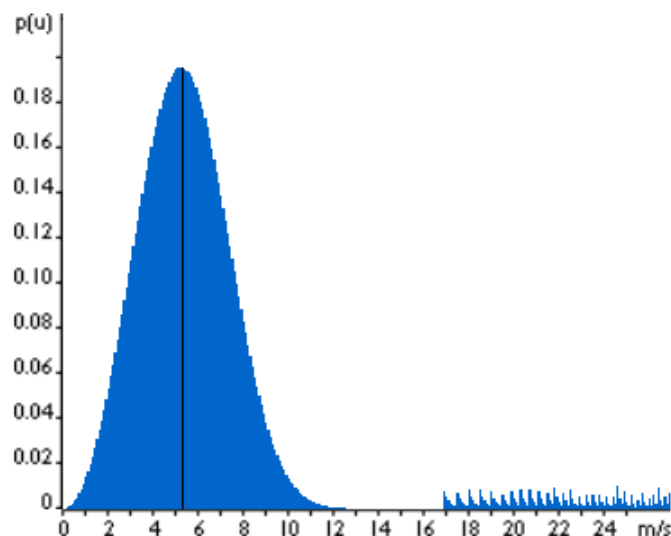
### 5.1. Varijacija parametra $k$

Parametar  $k$  je jedan od bitnih parametara koji utječe na Weibullovu razdiobu. Definira se kao faktor oblika koji određuje oblik Weibullove distribucije. Poprima vrijednosti u rasponu od 1 do 3. Mala vrijednost parametra  $k$  označava promjenjive vjetrove, a veća vrijednost označava konstantne vjetrove.

U nastavku je prikazan utjecaj variranja parametra  $k$  na radne parametre vjetroagregata, pri čemu je vrijednost parametra  $A$  konstantna i iznosi  $A = 6$  m/s.

#### 5.1.1. Prva varijacija

Proračun je prikazan koristeći odgovarajući kalkulator (vidi Poglavlje 4) [18]. Za slučaj prve varijacije odabrana je vrijednost parametra  $k = 3$ .

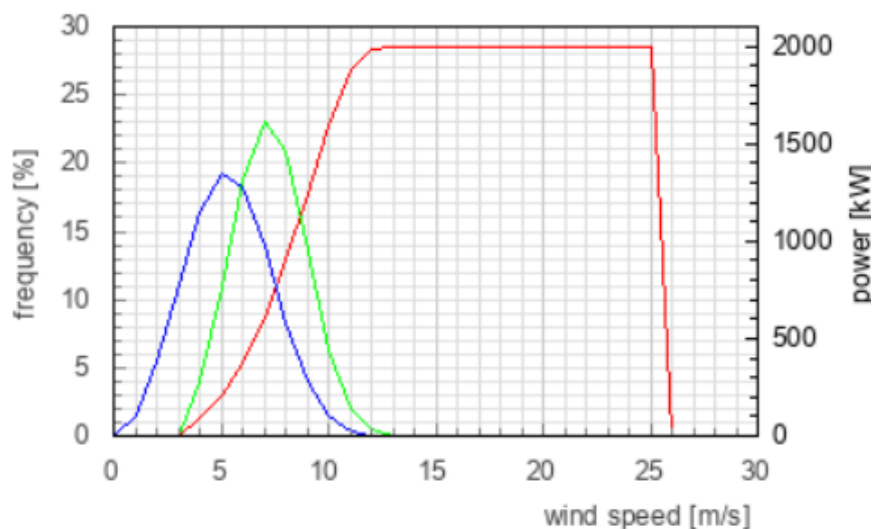


Slika 5.1.- Weibullova funkcija dobivena utjecajem parametara  $A = 6$  m/s,  $k = 3$  [18]

Na Slici 5.1. može se vidjeti kako parametar  $k = 3$  utječe na oblik krivulje uz vrijednost parametra  $A = 6$  m/s. Uz navedene vrijednosti dolazi se do vrijednosti medijana koja iznosi 5,3 m/s. Okomitom linijom označena je točka medijana dobivene krivulje koja dijeli 50 % brzine vjetra manje od medijana te 50 % brzine vjetra veće od medijana distribucije.

Procjena proizvodnje godišnje električne energije za odabrani vjetroagregat izvršena je upotrebom odgovarajućeg kalkulatora [19].

Uz parametre  $A = 6 \text{ m/s}$  i  $k = 3$ , te uz krivulju snage za odabrani vjetroagregat, proizlazi krivulja proizvodnje snage (označena zelenom bojom), kao što je prikazano na Slici 5.2.



Slika 5.2.- Karakteristične krivulje snage i Weibullove funkcije za  $A = 6 \text{ m/s}$ ,  $k = 3$  [19]

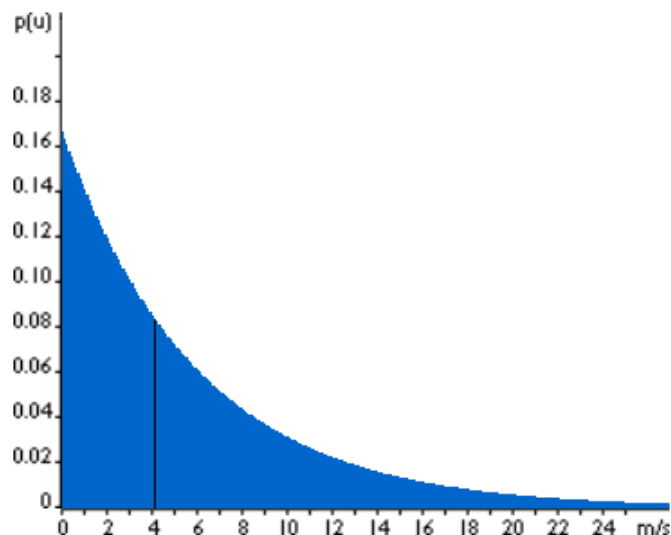
Tablica 5.1.- Radni parametri vjetroagregata za  $A = 6 \text{ m/s}$ ,  $k = 3$

Producer	Vestas
Type	V90
Capacity	2'000 kW
Rotor diameter	90 m
Power Production	3'161'904 kWh/year
Capacity factor <sup>1</sup>	18.0%
Full load hours <sup>2</sup>	1'580 h/year
Operating hours <sup>3</sup>	7'183 h/year

Iz Tablice 5.1 proizlazi faktor kapaciteta od 18 % , dok je procijenjena godišnja proizvodnja vjetroagregata od 2 MW u iznosu od 3.161.904 kWh. Vjetroagregat će raditi ukupno 7.183 h/god od kojih pod punim opterećenjem, pri nazivnoj snazi od 2 MW, oko 1.580 h/god. Iz proračuna proizlazi srednja brzina vjeta od  $v = 5,4 \text{ m/s}$ .

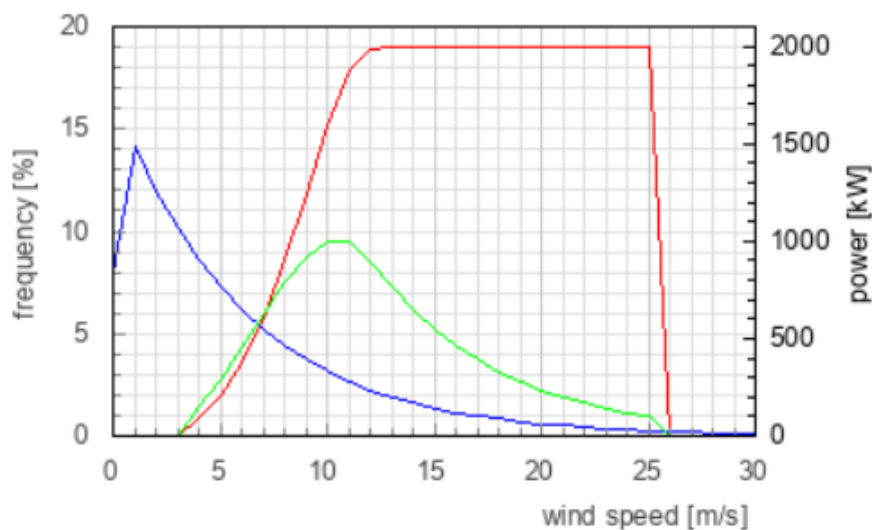
### 5.1.2. Druga varijacija

Proračun je izvršen na isti način kao i do sada, uz odabir vrijednosti parametra  $k = 1$ .



Slika 5.3.- Weibullova funkcija dobivena utjecajem parametara  $A = 6$  m/s,  $k = 1$  [18]

Odabirom parametra  $k = 1$ , uz konstantnu vrijednost parametra  $A = 6$  m/s, dobivena je Weibullova funkcija prikazana na Slici 5.3. Za navedeni slučaj dobiven je medijan funkcije 4,1 m/s što znači da će pola vremena brzina vjetra biti niža od 4,1 m/s, a pola vremena viša od 4,1 m/s. Procjena proizvodnje električne energije izvršena je po već objašnjenom postupku upotrebom kalkulatora „Power Calculator“ [19], dok su karakteristične krivulje snage prikazane Slikom 5.4.



Slika 5.4.-Karakteristične krivulje snage i Weibullove funkcije za  $A = 6$  m/s,  $k = 1$  [19]



Tablica 5.2.- Radni parametri vjetroagregata za  $A = 6 \text{ m/s}$ ,  $k = 1$ 

Producer	Vestas
Type	V90
Capacity	2'000 kW
Rotor diameter	90 m
Power Production	4'625'592 kWh/year
Capacity factor <sup>1</sup>	26.4%
Full load hours <sup>2</sup>	2'311 h/year
Operating hours <sup>3</sup>	4'763 h/year

U priloženoj Tablici 5.2. prikazani su radni parametri vjetroagregata iz koje proizlazi procjena proizvodnje električne energije od 4.625.592 kWh godišnje, sa faktorom kapaciteta od 26,4 %. Pod punim opterećenjem, pri nazivnoj snazi od 2 MW vjetroagregat će raditi 2.311 h/god.

S obzirom na Weibullovu razdiobu vjerojatnosti od 8.760 h/god, ukupan broj sati rada vjetroagregata je 4.763 h/god. Ostali broj sati vjetroagregat neće raditi jer će brzina vjetra biti manja od brzine uključivanja ili će biti veća od brzine isključivanja. Iz proračuna proizlazi srednja brzina vjetra od  $v = 6,0 \text{ m/s}$ .

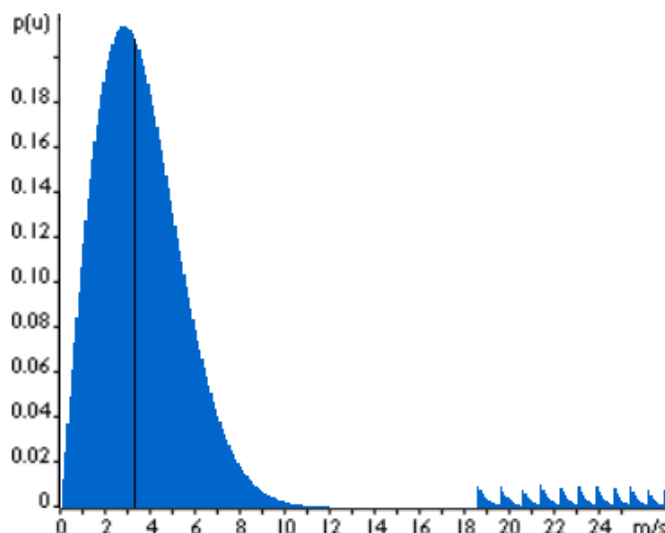
## 5.2. Varijacija parametra A

Uz parametar oblika  $k$  potrebno je izvršiti i analizu utjecaja parametra mjere  $A$  na radne parametre vjetroagregata. Parametar  $A$  predstavlja srednju brzinu vjetra na nekom području, odnosno opisuje vjetrovitost lokacije.

U nastavku će biti prikazane varijacija parametra  $A$  uz primjenu konstantne vrijednosti parametra  $k = 2$ .

### 5.2.1. Treća varijacija

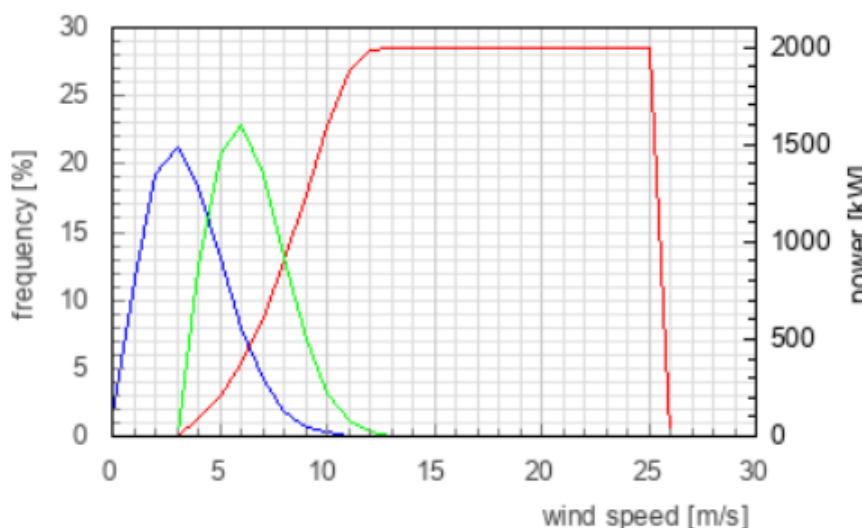
Pri proračunu treće varijacije odabrana je vrijednost parametara  $A = 4 \text{ m/s}$ , a proračun će se izraditi primjenom kalkulatora „Weibull Distribution Plotter Programme“ [18].



Slika 5.5.- Weibullova funkcija dobivena utjecajem parametara  $A=4$  m/s,  $k=2$  [18]

Odabirom parametra  $A = 4$  m/s te vrijednosti parametra  $k = 2$ , dobivena je Weibullova funkcija prikazana na Slici 5.5. Za navedeni slučaj dobiven je medijan funkcije od 3,3 m/s, što znači da će pola vremena brzina strujanja vjetra biti niža od 3,3 m/s, a pola vremena viša od 3,3 m/s.

Procjena proizvodnje električne energije izvršena je upotrebom kalkulatora „Power Calculator“ [19], dok su karakteristične krivulje snage prikazane Slikom 5.6.



Slika 5.6.-Karakteristične krivulje snage i Weibullove funkcije za  $A= 4$  m/s,  $k=2$  [19]

U Tablici 5.3. može se vidjeti dobivena procjena proizvedene električne energije u iznosu od 1.136.096 kWh godišnje, s malim faktorom kapaciteta od 6,5 %. Pod punim opterećenjem, pri nazivnoj snazi od 2 MW, vjetrogenerator će raditi samo 568 h/god. Ukupan broj sati rada

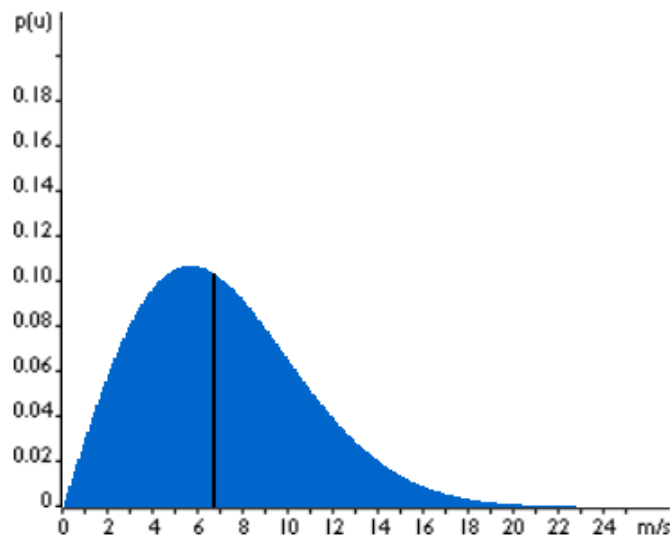
vjetrogeneratora iznosi 4.074 h/god, a preostali broj sati vjetrogenerator neće raditi. Može se zaključiti da niska vrijednost parametra  $A$  značajno utječe na proizvodnju električne energije. Proračunom je određena vrijednost srednje brzine vjetra od  $v = 3,5$  m/s.

Tablica 5.3.- Radni parametri vjetroagregata za  $A = 4$  m/s,  $k = 2$

Producer	Vestas
Type	V90
Capacity	2'000 kW
Rotor diameter	90 m
Power Production	1'136'096 kWh/year
Capacity factor <sup>1</sup>	6.5%
Full load hours <sup>2</sup>	568 h/year
Operating hours <sup>3</sup>	4'074 h/year

### 5.2.2. Četvrta varijacija

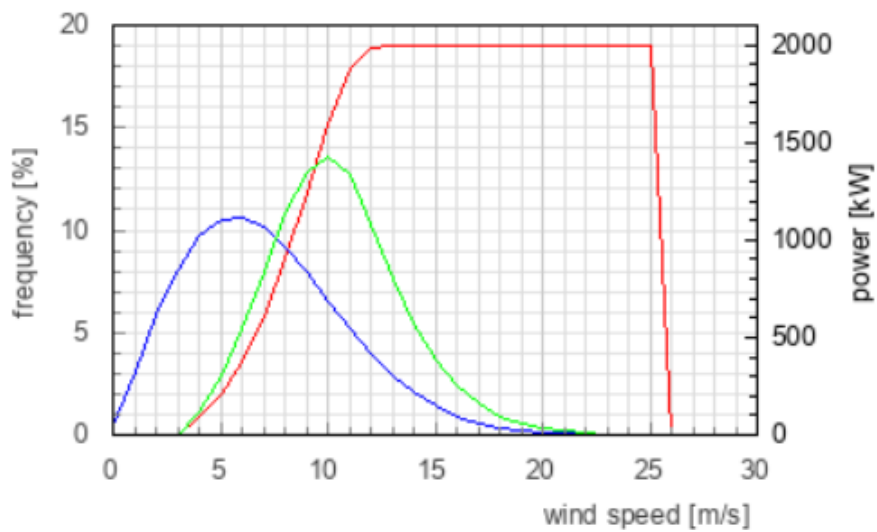
Pri proračunu četvrte varijacije odabrana je vrijednost parametara  $A = 8$  m/s, a proračun će se izraditi primjenom kalkulatora „Weibull Distribution Plotter Programme“ [18].



Slika 5.7.- Weibullova funkcija dobivena utjecajem parametara  $A = 8$  m/s,  $k = 2$  [18]

Odabirom parametra  $A = 8$  m/s i vrijednosti parametra  $k = 2$ , dobivena je Weibullova funkcija prikazana na Slici 5.7. Okomita linija predstavlja medijan funkcije 6,7 m/s.

Procjena proizvodnje električne energije izvršena je upotrebom kalkulatora „Power Calculator“ [19], dok su karakteristične krivulje snage prikazane Slikom 5.8.



Slika 5.8.- Karakteristične krivulje snage i Weibullove funkcije za  $A= 8 \text{ m/s}$ ,  $k=2$  [19]

Tablica 5.4.- Radni parametri vjetroagregata za  $A= 8 \text{ m/s}$ ,  $k=2$

Producer	Vestas
Type	V90
Capacity	2'000 kW
Rotor diameter	90 m
Power Production	6'715'190 kWh/year
Capacity factor <sup>1</sup>	38.3%
Full load hours <sup>2</sup>	3'355 h/year
Operating hours <sup>3</sup>	7'234 h/year

Iz Tablici 5.4. proizlazi procijenjena proizvodnja električne energije od 6.715.190 kWh godišnje, uz faktor kapaciteta od 38,3%. Pod punim opterećenjem, pri nazivnoj snazi od 2 MW, vjetroagregat će raditi 3.355 h/god. Ukupan broj sati rada vjetroagregata je 7.234 h/god, a preostali broj sati vjetroagregat neće raditi. Proračunom je određena vrijednost srednje brzine vjetrova od  $v = 7,1 \text{ m/s}$ .

## 6. Usporedba dobivenih rezultata

U završnom radu potrebno je obraditi rezultate variranja parametara Weibullove distribucije vjetra u odnosu na osnovni oblik Weibullove distribucije odabran u poglavlju 4, te usporediti početnu procjenu proizvodnje električne energije odabranog vjetroagregata s ostalim vrijednostima. Pri procjeni proizvodnje električne energije, u korištenom programu [19] pretpostavljena je raspoloživost vjetroagregata od 100 %, što znači da će vjetroagregat biti raspoloživ svih 8.760 sati godišnje. S obzirom da je potrebno predvidjeti redovito održavanje vjetroagregata, eventualne kvarove i servise, u praksi je potrebno u proračun uzeti u obzir raspoloživost vjetroagregata tijekom godine korištenjem koeficijenta  $r$  u iznosu od 0,9 do 0,95.

Usporedba osnovnih radnih parametara vjetroagregata za varijaciju parametra  $k$ , uz konstantnu vrijednost parametra od  $A = 6$  m/s, prikazana je u *Tablici 6.1.*

*Tablica 6.1.- Rezultati osnovnog Weibullovog oblika,  $k = 2$  i varijacije parametra  $k$*

	Osnovni oblik ( $k = 2$ )	Varijacija 1 ( $k = 3$ )	Varijacija 2 ( $k = 1$ )
Proizvodnja energije [kWh/god]	3.729.766	3.161.904	4.625.592
Faktor kapaciteta [%]	21,3	18	26,4
Rad s punim opterećenjem [h/god]	1.864	1.580	2.311
Ukupan rad VA [h/god]	6.233	7.183	3.997

Iz *Tablice 6.1.* jasno se vidi da povećanje vrijednosti faktora oblika ( $k = 3$ ) rezultira smanjenom proizvodnjom godišnje električne energije u odnosu na osnovni oblik ( $k = 2$ ). Isto vrijedi i za faktor kapaciteta. Ukupan rad vjetrogeneratora (7.183 h/god) je viši u odnosu na osnovni oblik (6.233 h/god), ali će vjetroagregat raditi manje vremena pri punom opterećenju na nazivnoj snazi od 2 MW.

U slučaju varijacije 2 (smanjenje vrijednosti  $k = 1$ ) procijenjena je najviša proizvodnja električne energije u iznosu od 4.625.592 kWh/god, što je znatno više u odnosu na osnovni oblik. Također i faktor kapaciteta je viši (26,4 %), dok je ukupan rad vjetroagregata najniži i iznosi 3.997 h/god.

*Tablica 6.2.- Usporedba brzine vjetra osnovnog oblika  $k=2$  i varijacije parametra  $k$*

	Osnovni oblik ( $k = 2$ )	Varijacija 1 ( $k = 3$ )	Varijacija 2 ( $k = 1$ )
Brzina vjetra $v$ [m/s]	5,32	5,4	6

Može se zaključiti da je procjena proizvodnje električne energije najveća u slučaju varijacije 2 ( $A = 6 \text{ m/s}$ ,  $k = 1$ ), pri čemu je vremenski period rada vjetroagregata najkraći. U tom slučaju vjetrovi su vrlo promjenjivi te je brzina vjetra od  $v = 6 \text{ m/s}$  najveća (Tablici 6.2.).

Usporedba osnovnih radnih parametra vjetroagregata za varijaciju parametra  $A$ , uz konstantnu vrijednost parametra  $k = 2$ , prikazana je u Tablici 6.3.

Tablica 6.3.- Rezultati osnovnog Weibullovog oblika  $A = 6 \text{ m/s}$  i varijacije parametra  $A$

	Osnovni oblik ( $A = 6 \text{ m/s}$ )	Varijacija 3 ( $A = 4 \text{ m/s}$ )	Varijacija 4 ( $A = 8 \text{ m/s}$ )
Proizvodnja energije [kWh/god]	3.729.766	1.136.096	6.715.190
Faktor kapaciteta [%]	21,3	6,5	38,3
Rad s punim opterećenjem [h/god]	1.864	568	3.355
Ukupan rad VA [h/god]	6.233	4.074	7.234

Iz Tablice 6.3. može se zaključiti da se snižavanjem vrijednosti parametra  $A$  smanjuje i količina proizvedene električne energije, uz značajno smanjenje faktora kapaciteta. Broj sati rada pod punim opterećenjem je najniži i iznosi samo 568 h/god, dok je ukupan rad VA procijenjen na niskih 4.074 h/god.

Povećanjem vrijednosti parametra  $A$  (varijacija 4) proizvodnja električne energije se približno udvostručila u odnosu na osnovni oblik, uz porast faktora kapaciteta na 38,3 %. Ukupan broj sati rad vjetroagregata povećan je na 7.234 h/god, dok će vjetroagregat raditi pri nazivnom opterećenju 3.355 h/god. Može se zaključiti da je vjetar u ovom slučaju najstabilniji i visokog intenziteta, te proizvodi najviše energije.

Tablica 6.4.- Usporedba brzine vjetra osnovnog oblika  $A = 6 \text{ m/s}$  i varijacija parametra  $A$

	Osnovni oblik ( $A = 6 \text{ m/s}$ )	Varijacija 3 ( $A = 4 \text{ m/s}$ )	Varijacija 4 ( $A = 8 \text{ m/s}$ )
Brzina vjetra $v$ [m/s]	5,32	3,5	7,1

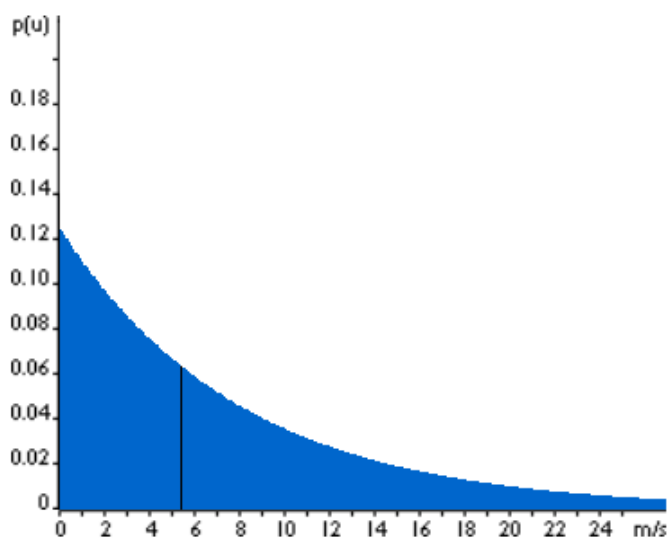
Najveća dobivena brzina vjetra je postignuta pri povećanje parametra  $A = 8 \text{ m/s}$ , te iznosi  $v = 7,1 \text{ m/s}$  kao što je prikazano u Tablici 6.4. U odnosu na sve prikazane varijacije i osnovni oblik, varijacija 4 ( $A = 8 \text{ m/s}$  i  $k = 2$ ) predstavlja najbolju kombinaciju parametara Weibullove razdiobe jer rezultira u najpovoljnijim radnim parametrima vjetroagregata uz najveću proizvodnju električne energije.

## 7. Varijacija parametara A i k

U ovom poglavlju izvršena je varijacija „najlošijih“ i „najboljih“ parametara A i k na osnovu analiza prikazanih u poglavljima 5 i 6, a kako bi se provjerio utjecaj iste na procjenu proizvodnje električne energije.

### 7.1. Varijacija najboljih parametara A i k

Za proračun su uzeti parametri Weibullove distribucije koji su se pokazali kao idealni, i to  $k = 1$  i  $A = 8$  m/s.

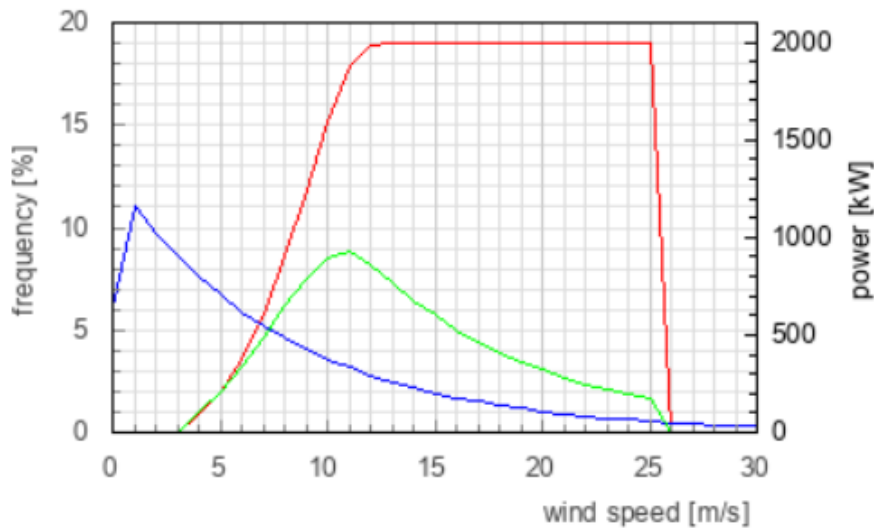


Slika 7.1.- Weibullova funkcija dobivena utjecajem parametara  $k = 1$  i  $A = 8$  m/s [18]

Odabirom parametra  $A = 8$  m/s i vrijednosti parametra  $k = 1$ , dobivena je Weibullova funkcija prikazana na Slici 7.1. Okomita linija predstavlja medijan funkcije koji iznosi 5,4 m/s.

Procjena proizvodnje električne energije izvršena je upotrebom kalkulatora „Power Calculator“ [19], dok su karakteristične krivulje snage prikazane Slikom 7.2.

U Tablici 7.1. prikazani su radni parametri vjetroagregata pri čemu proizvodnja električne energije iznosi oko 5.906.706 kWh godišnje, uz faktor kapaciteta od 33,7 %. Pod punim opterećenjem, pri nazivnoj snazi od 2 MW, vjetrogenerator će raditi 2.951 h/god. Ukupan broj sati rada vjetroagregata je 5.294 h/god. Vrijednost srednje brzine vjetra iznosi  $v = 8$  m/s.



Slika 7.2.- Karakteristične krivulje snage i Weibullove funkcije za  $A = 8 \text{ m/s}$ ,  $k = 1$  [19]

Tablica 7.1.- Radni parametri vjetroagregata za  $A = 8 \text{ m/s}$ ,  $k = 1$

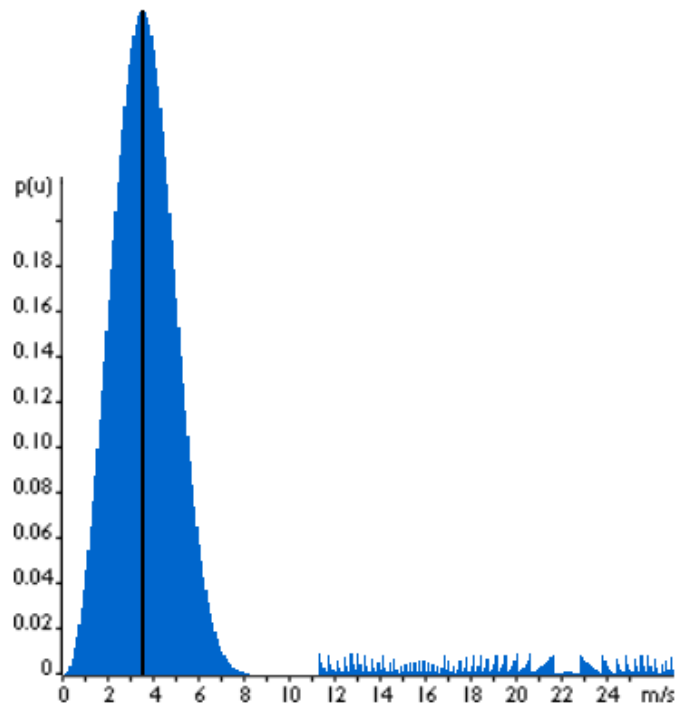
Producer	Vestas
Type	V90
Capacity	2'000 kW
Rotor diameter	90 m
Power Production	5'906'706 kWh/year
Capacity factor <sup>1</sup>	33.7%
Full load hours <sup>2</sup>	2'951 h/year
Operating hours <sup>3</sup>	5'294 h/year

## 7.2. Varijacija najlošijih parametara $A$ i $k$

Za proračun su uzeti parametri Weibullove distribucije koji su se pokazali kao najlošiji, i to  $k = 3$  i  $A = 4 \text{ m/s}$ .

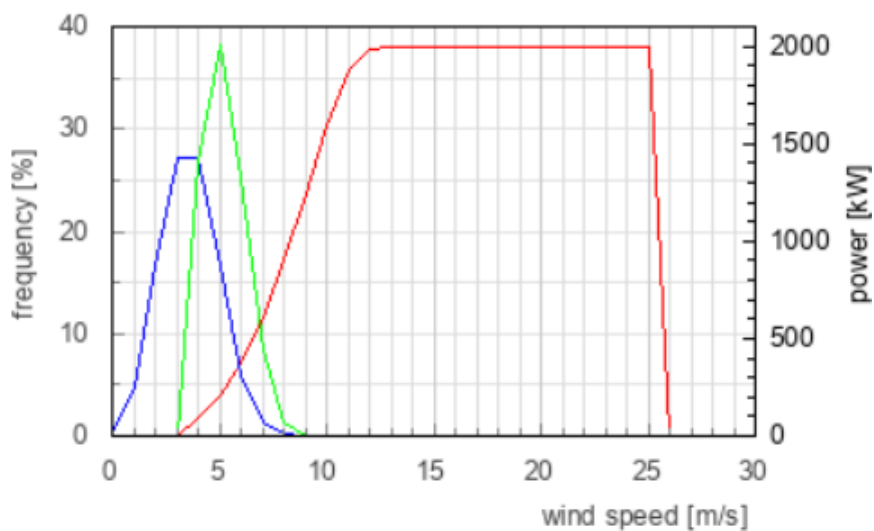
Odabirom parametra  $A = 4 \text{ m/s}$  i vrijednosti parametra  $k = 3$ , dobivena je Weibulova funkcija prikazana na Slici 7.3. Okomita linija predstavlja medijan funkcije koji iznosi  $3,5 \text{ m/s}$ .





Slika 7.3.- Weibullova funkcija dobivena utjecajem parametara  $k=3$  i  $A=4$  m/s [18]

Procjena proizvodnje električne energije izvršena je upotrebom kalkulatora „Power Calculator“ [19], dok su karakteristične krivulje snage prikazane Slikom 7.4.



Slika 7.4.- Karakteristične krivulje snage i Weibullove funkcije za  $A=4$  m/s,  $k=3$  [19]

U *Tablici 7.2.* prikazani su radni parametri vjetroagregata pri čemu proizvodnja električne energije iznosi oko 781.268 kWh godišnje, uz faktor kapaciteta od 4,5 %. Pod punim opterećenjem, pri nazivnoj snazi od 2 MW, vjetrogenerator će raditi 390 h/god. Ukupan broj sati rada vjetroagregata je 4.483 h/god. Vrijednost srednje brzine vjetra iznosi  $v = 3,6$  m/s.

*Tablica 7.2.- Radni parametri vjetroagregata za  $A=4$  m/s,  $k= 3$*

Producer	Vestas
Type	V90
Capacity	2'000 kW
Rotor diameter	90 m
Power Production	781'268 kWh/year
Capacity factor <sup>1</sup>	4.5%
Full load hours <sup>2</sup>	390 h/year
Operating hours <sup>3</sup>	4'483 h/year

### 7.3. Usporedba

Iz *Tablice 7.3.* vidljiva je velika razlika u procjeni proizvodnje električne energije pri odabranim kombinacijama vrijednosti parametara  $A$  i  $k$ . Što je veća vrijednost parametra  $A$  povećava se i brzina vjetra, koja u prvom slučaju ( $k = 1, A = 8$  m/s) iznosi  $v = 8$  m/s, dok je u drugom slučaju brzina vjetra znatno manja te iznosi  $v = 3,6$  m/s. Kako se vrijednost faktora  $A$  povećava, povećava se i proizvodnja električne energije, isto kao i faktor kapaciteta.

Konačno, prethodna „varijacija 4“, pri vrijednostima parametara  $k = 2$  te  $A = 8$  m/s, i dalje se pokazala kao najbolji izbor u odnosu na sve do sada prezentirane kombinacije vrijednosti parametara  $A$  i  $k$ , te je rezultirala najvišom godišnjom proizvodnjom električne energije.

*Tablica 7.3.- Usporedba rezultata varijacije parametara  $A$  i  $k$*

	$k = 1, A = 8$ m/s	$k = 3, A = 4$ m/s
Proizvodnja energija [kWh/god]	5.906.706	781.268
Faktor kapaciteta [%]	33,7	4,5
Rad s punim opterećenjem [h/ god]	2.951	390
Ukupan rad VA [h/ god]	5.294	4.483

## 8. Zaključak

Završnim radom prikazana je procjena proizvodnje električne energije odabranog vjetroagregata s obzirom na promjene oblika Weibullove distribucije vjetra. Varijacijom parametara Weibullove distribucije postignute su različite vrijednosti potencijala i karakteristike vjetra pri kojima su se analizirali osnovni radni parametri vjetroagregata.

Tijekom analize korišteni su različiti „on-line“ kalkulatori pomoću kojih je generiran željeni oblik Weibullove distribucije, izvršen izračun srednje vrijednosti brzine za odabrane vrijednosti parametara  $A$  i  $k$ , te simuliran rad odabranog vjetroagregata uz prikaz njegovih osnovnih radnih parametara i godišnje proizvodnje električne energije.

Varijacijom parametara Weibullove distribucije mogu se donijeti slijedeći zaključci:

- smanjenjem vrijednosti parametra oblika vjetra  $k$  (pri  $A = \text{konst.}$ ) povećava se količina proizvedene električne energije,
- povećanjem vrijednosti parametra odnosa veličine  $A$  (pri  $k = \text{konst.}$ ) povećava se i brzina vjetra te samim time i količina proizvedene električne energije,
- najbolja kombinacija parametara Weibullove distribucije je pri odabranim vrijednostima parametra  $k = 2$  i  $A = 8 \text{ m/s}$ , pri čemu proizvodnja električne energije postiže najvišu vrijednost od 6.715.190 kWh/god., faktor kapaciteta od 38,3 %, broj sati rada vjetroagregata pri nazivnom opterećenju od 3.355 h/god., te ukupni broj sati rada od 7.234 h/god.

## Literatura

1. <https://zir.nsk.hr/islandora/object/etfos%3A2520/datastream/PDF/view>
2. I. Vinković, FSB Zagreb, 2009
3. <https://ccsf.instructure.com/courses/38253/pages/reading-8-dot-4-continuous-random-variables>
4. <https://www.intechopen.com/books/wind-energy-management/weibull-distribution-for-estimating-the-parameters>
5. [https://www.researchgate.net/figure/Weibull-distribution-of-wind-speeds-where-k-15-3-and-c-48-m-s\\_fig1\\_267920828](https://www.researchgate.net/figure/Weibull-distribution-of-wind-speeds-where-k-15-3-and-c-48-m-s_fig1_267920828)
6. <http://drømstørre.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/en/tour/wres/weibull/index.htm>
7. <https://hr.wikipedia.org/wiki/Vjetroagregat>
8. Z. Šimić: Energija vjetra, FER Zagreb, 2010
9. B. Labudović: Obnovljivi izvori energije, EM Zagreb, 2002
10. Peljar za male brodove I: autor T. Bilić
11. [https://www.researchgate.net/figure/Power-curve-as-a-function-of-wind-speed\\_fig2\\_281761561](https://www.researchgate.net/figure/Power-curve-as-a-function-of-wind-speed_fig2_281761561)
12. <https://www.unizd.hr/Portals/6/nastavnici/Sanja%20Lozic/OPK%206%20-%20Energija%20vjetra.pdf>
13. D. Šljivac, Z. Šimić: Vjetroelektrane, ETF Osijek
14. [https://www.vestas.com/en/products/2-mw-platform/v90-2\\_0\\_mw#](https://www.vestas.com/en/products/2-mw-platform/v90-2_0_mw#)
15. [https://www.vestas.com/en/about/find\\_vestas](https://www.vestas.com/en/about/find_vestas)
16. <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/16-vestas-v90>
17. The Swiss Wind Power Data Website – Weibull Calculator, <https://wind-data.ch/tools/weibull.php>
18. <http://xn--drmsttre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/en/tour/wres/weibull/index.htm>
19. The Swiss Wind Power Data Website – Power Calculator, <https://wind-data.ch/tools/powercalc.php>