

# Statistička analiza vjetra i analiza proizvodnje buduće vjetroelektrane na zadanoj lokaciji

---

Prka, Marko

Master's thesis / Diplomski rad

2019

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:142750>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-10**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU**

**ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET**

**Sveučilišni studij**

**STATISTIČKA ANALIZA VJETRA I ANALIZA  
PROIZVODNJE BUDUĆE VJETROELEKTRANE NA  
ZADANOJ LOKACIJI**

**Diplomski rad**

**Marko Prka**

**Osijek, 2019.**

## Sadržaj

1. Uvod.....	3
2. Planiranje vjetroelektrana.....	3
2.1. Mjerenje vjetra na odabranoj lokaciji.....	4
2.2. Energija vjetra u Hrvatskoj.....	6
2.3. Dizajn vjetroelektrane.....	8
2.4. Gubitci vjetroelektrane.....	12
2.5. Aerodinamički gubitci.....	12
2.6. Nedostatci vjetroelektrana.....	15
3. Planiranje vjetroelektrane.....	16
3.1. Odabir lokacije.....	16
3.2. Statistička analiza podataka.....	18
3.2.1. Gama distribucija.....	20
3.2.2. Logaritamska distribucija.....	21
3.2.3. Rayleighova distribucija.....	21
3.2.4. Weibull distribucija.....	23
4. Analiza rada vjetroelektrane.....	27
4.1. Usporedba podataka s drugih lokacija.....	30
5. Zaključak.....	34
6. Literatura.....	35
7. Sažetak.....	37
8. Abstract.....	38
9. Životopis.....	39

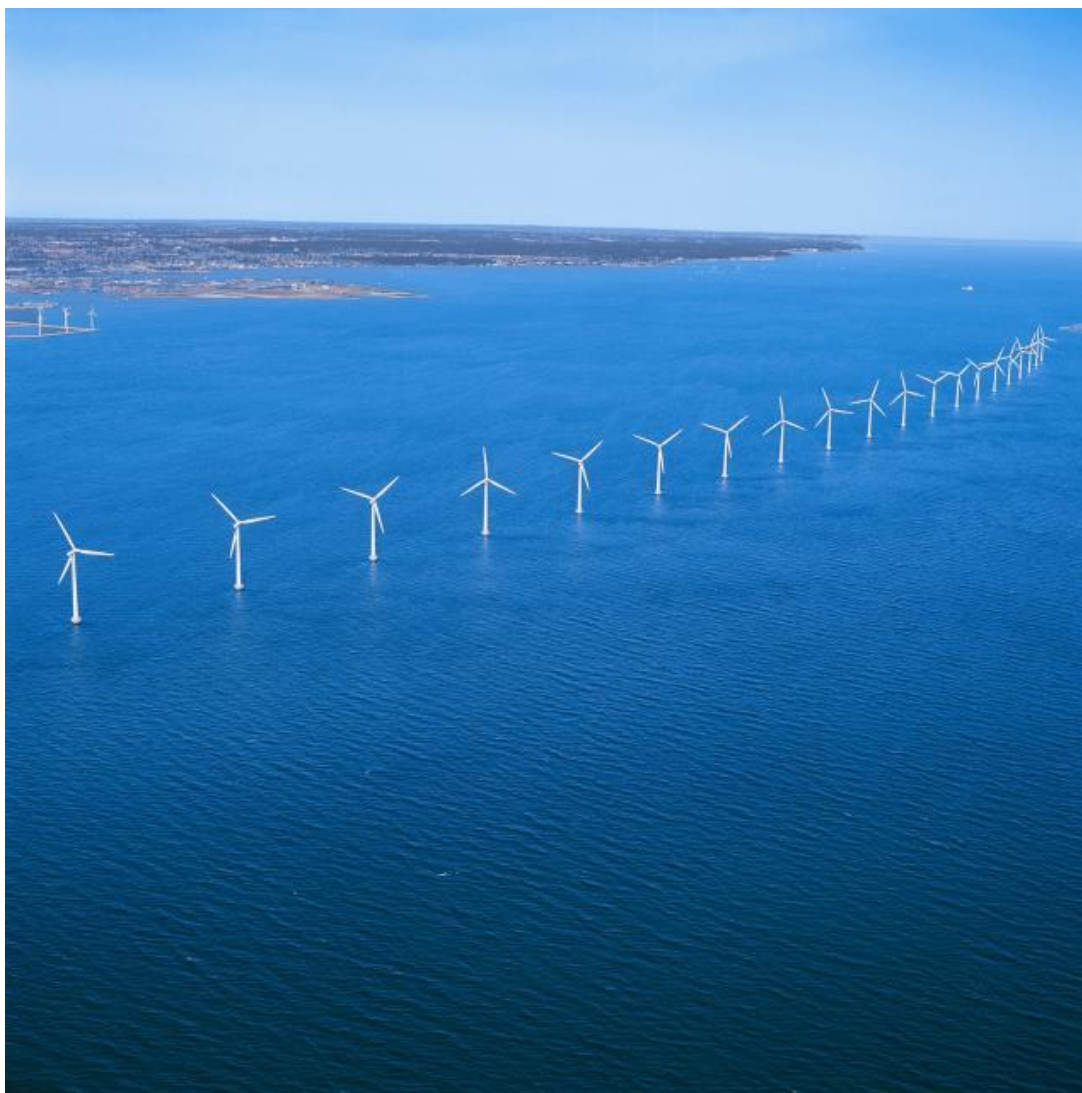
## 1. Uvod

Zadatak je diplomskog rada, prema vlastitom izboru, odabrati povoljno mjesto za postavljanje vjetroelektrane. Osim toga, zadatak je i odabrati lokaciju analizom brzina vjetra iz meteoroloških stanica dostupnih na internetu, navesti metode i statistički analizirati brzine vjetra te njihove distribucije. Dobiveni rezultati koristit će se u programu DIGSILENT na jednostavnoj mreži s opterećenjem, generatorom i priključenom vjetroelektranom, čija će se proizvodnja modelirati pomoću funkcija distribucije. Dobiveni će se rezultati analizirati i usporediti s nekoliko nasumičnih lokacija.

## 2. Planiranje vjetroelektrana

Planiranje vjetroelektrane započinjemo grubim mjerenjima vjetra na željenim lokacijama te odabiremo najpovoljniju. Pri odabiru je bitno uzeti u obzir i druge faktore kao što su pristupni putevi, udaljenost lokacije od prijenosne mreže te izgled terena. Kada je lokacija zadovoljila naše uvjete počinjemo s detaljnijim ispitivanjima što su tehnički zahtjevi i mjerenje vjetra. Najviše se pažnje pridodaje mjerenju vjetra što je bitno pri odabiru vjetroagregata te njihovom pozicioniranju na lokaciji. Pod tehničkim zahtjevima razmatramo pristupne ceste do lokacije potrebne za njenu izgradnju i održavanje te ostale fizičke zapreke [1].

Ove smjernice se ujedno odnose i na priobalne vjetroelektrane. Najveća razlika obalnih i priobalnih elektrana je njihova veličina jer se u priobalnim vjetroelektranama koriste najveći agregati do 5MW snage te promjera lopatica 80m. Tehnički problemi kod izgradnje priobalne vjetroelektrane su također puno manji u odnosu na obalne jer se veliki dijelovi konstrukcija lakše transportiraju otvorenim morem. Cijena izgradnje priobalne i obalne vjetroelektrane je isto pa je ekonomski isplativije graditi priobalne vjetroelektrane zbog većeg prinosa energije. Prepreke za vjetar su također uvelike manje na otvorenom moru. S druge strane, teže je njihovo postavljanje s obzirom da su na vodi te su udaljene od prijenosne mreže. Problem predstavlja zaštita od korozije te njihovo održavanje s obzirom na udaljenost [1].



Slika 1.1. *Priobalna vjetroelektrana Greater Gabbard [2]*

## **2.1. Mjerenje vjetra na odabranoj lokaciji**

Danas se računalno iz baza podataka može dobiti uvid o brzinama vjetra na željenim lokacijama no ipak, kad pristupamo planiranju vjetroelektrane trebamo preciznija mjerenja vjetra zbog ovisnosti prinosa energije i ekonomske isplativosti [1].

Mjerenja se vrše tako da postavljamo anemometre na stupove u visini vjetroturbine. Stupove pozicioniramo na mjesta potencijalnih vjetroagregata na lokaciji a mjerenja se vrše kroz što duži vremenski period čime dobivamo bolju predodžbu o potencijalnoj vjetroenergiji lokacije.

Glavna stavka pri projektiranju vjetroagregata je brzina vjetra koja je također potrebna pri proračunu proizvodnje energije te ekonomske isplativosti vjetroelektrane [1].

Ovisnost prinosa energije i ekonomske isplativosti možemo vidjeti na slici 1.2.. Primjerice, kada bi se srednja brzina vjetra povećala s 5 m/s na 10 m/s proizvodnja bi porasla za 171%. Troškovi izgradnje vjetroelektrane su manje bitni kod proračuna ekonomske isplativosti s obzirom na ovakve osjetljivosti brzine vjetra i proizvodnje [1].

Wind Speed (m/s)	Wind Speed Normalised to 6 m/s (%)	Energy Production of 10 MW Wind Farm (MWh/annum) <sup>2</sup>	Energy Production Normalised to 6 m/s site (%)	Capital Cost Normalised to 6 m/s site (%)
5	83	11,150	63	100
6	100	17,714	100	100
7	117	24,534	138	102
8	133	30,972	175	105
9	150	36,656	207	110
10	167	41,386	234	120

<sup>2</sup> Assumes typical turbine performance, air density of 1.225 kg/m<sup>3</sup>, total losses of 12 % and Raleigh wind speed distribution.

Slika 1.2. Osjetljivost proizvodnje energije o brzini vjetra [1]

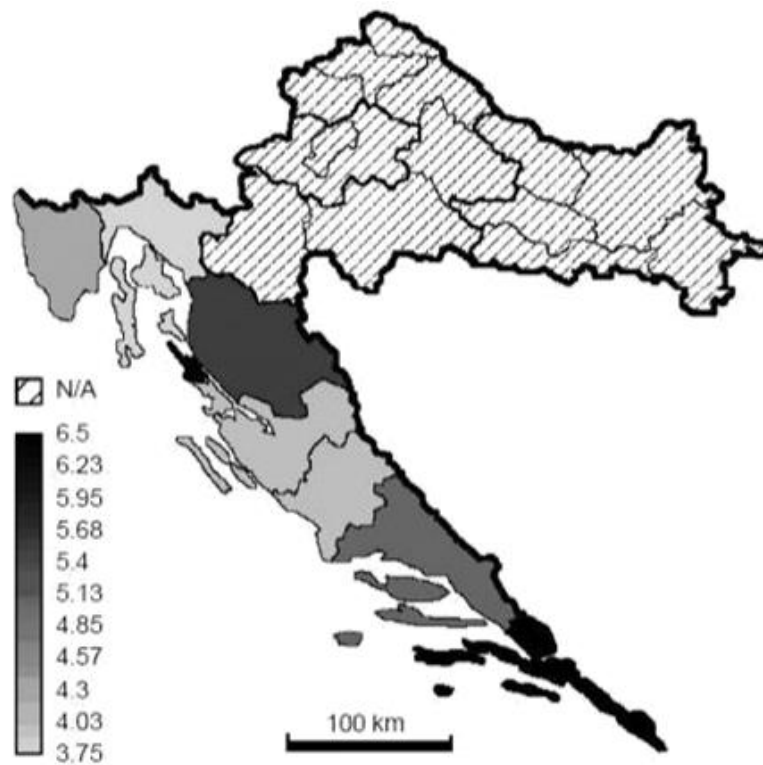
Upravo je iz tog razloga potrebno uložiti maksimalan trud pri analizi vjetra na odabranoj lokaciji, odnosno produžiti vremenski period mjerenja te povećati geografsku pokrivenost mjerenja. Također, poželjno je poznavati ružu vjetrova za odabranu lokaciju, ona nam daje vrijednosti brzine vjetra u smjerovima što možemo iskoristiti za najbolji raspored vjetroagregata. Pri analiziranju brzine vjetra obično se koristi Weibullova razdioba. Ovaj matematički model vrlo dobro opisuje brzine vjetra na lokacijama. Želimo li još preciznije rezultate analize potrebno je produžiti interval prikupljanja podataka s lokacije jer 10% odstupanja u brzini vjetra znači 20% za proizvodnju. Svaka dodatna godina mjerenja nakon prve smanjuje eventualna odstupanja za 3-4% pa je poželjno da to vrijeme bude bar 3 godine [1].

U praksi je korisno uz naša mjerenja pronaći drugi pouzdani izvor podataka o brzinama vjetra na lokaciji te iskoristiti naša kratkoročna mjerenja te u korelaciji sa starima doći do točnijeg dugoročnog predviđanja [1].

## 2.2. Energija vjetra u Hrvatskoj

Državni hidrometeorološki zavod (DHMZ) svojom mrežom postaja postavljenih po cijeloj državi zadužen je za mjerenja brzine i smjera vjetra. Brzina i smjerovi vjetra mjere se anemometrima koji su postavljeni na 10 metara visine na otvorenom prostoru [3].

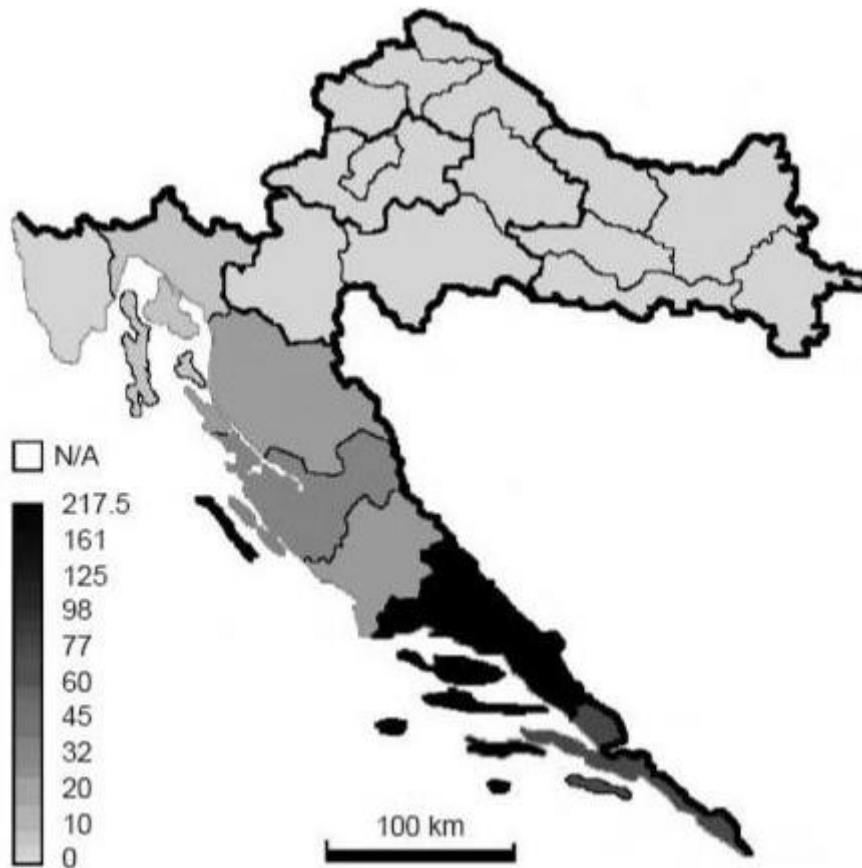
Ovako prikupljenim podacima kroz 10 godina dobivena je srednja brzina vjetra prikazana slikom (1.3.). Odmah primjećujemo kako je brzina vjetra u priobalnom djelu Hrvatske znatno veća od kontinentalnog. Vidimo kako su područja s najvećim brzinama vjetra planine te podnožje Velebita [3].



Slika 1.3. Prostorna razdioba srednje brzine vjetra [m/s] [3]

Razlog većeg energetskog potencijala vjetra koji vidimo upravo na vrhovima planina je njihova nadmorska visina. Na Velebitu vidimo velike srednje brzine vjetra zbog bure koja je najjači vjetar u Hrvatskoj. Područja s najmanje vjetra u Hrvatskoj su Ličko polje, Istra te Ploče gdje je srednja brzina vjetra oko 1m/s. Bura u Hrvatskoj je izrazito važan čimbenik u proizvodnji električne energije korištenjem potencijala vjetra, no zbog njenog karaktera potrebno je napraviti nove procjene i u analizu uključiti turbulencije bure zbog smanjenja

iskoristivosti energetskog potencijala. Pri udaru bure vjetroelektrana staje s radom kako ne bi došlo do oštećenja djelova agregata [3].



Slika 1.4. *Maksimalna snaga potencijalnih vjetroelektrana [MW] [3]*

Bura je vjetar koji nastaje ulaskom hladnog zraka iz smjera sjeveroistok – istok te ispunjava panonsku nizinu, dok je zrak iznad Jadrana topao. Prolaskom ovog hladnog zraka preko Dinarida na Jadran, padajući niz jugozapadnu strminu ubrzava, te se taj vjetar manifestira kao bura [3].

Hrvatska danas broji 20 vjetroelektrana instaliranih snaga od 6 do 48 MW koje zajedno čine 569,55 MW te godišnje daju 1475 GWh energije. Najveće vjetroelektrane na našem području su VE Danilo u Šibensko-kninskoj županiji, snage 43,7 MW, VE Poštak s instaliranih 44,2 MW nalazi se u području općine Gračac, dok je naša najveća VE Lukovac na području Splitsko-dalmatinske županije, koja napaja snagom od 48 MW raspoređenih na 16 agregata pojedinačnih snaga 3 MW [4].





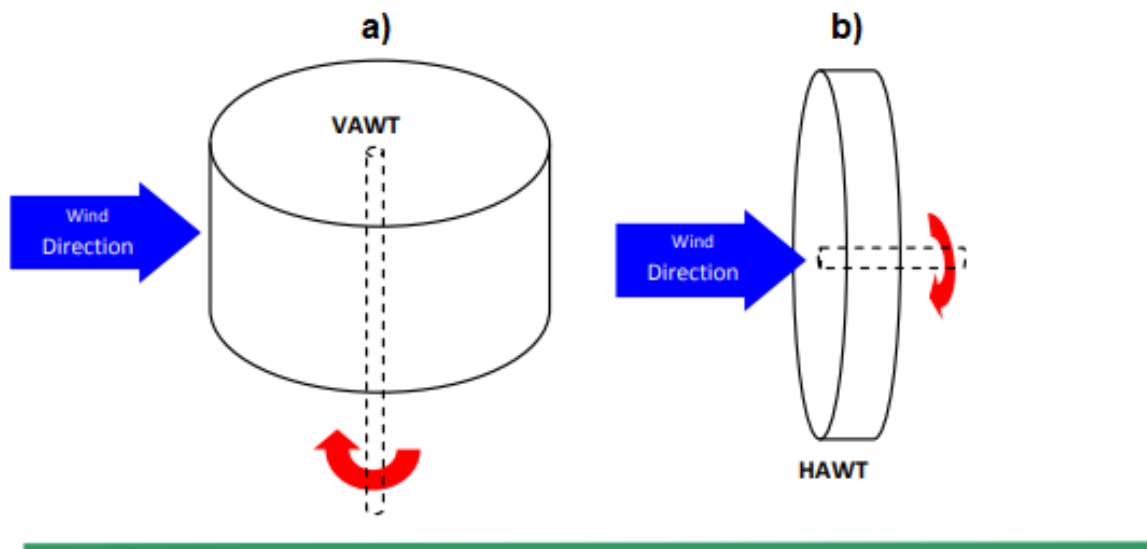
Slika 1.5. *Vjetroelektrana Lukovac [5]*

Trenutačno je u planu izgradnja vjetroelektrane Mravinjac snage 87 MW u Dubrovačko-neretvanskoj županiji. Vjetroelektrana će sadržavati 29 vjetroagregata pojedinačnih snaga 3 MW, čime će ujedno biti i najveća vjetroelektrana u Hrvatskoj [4].

### **2.3. Dizajn vjetroelektrane**

Energija vjetra koristila se stotinama godina koristeći vjetrenjače izrađene od drveta, tkanine i kamena kako bi vršila mehanički rad. Povijesni nacrti ovih konstrukcija ubrzo su zamijenjeni (19. stoljeće) motorima na fosilna goriva te koristeći energiju iz već postojećih elektroenergetskih mreža. Bolje razumijevanje aerodinamike i napredak u materijalima, osobito polimerima, doveli su do povratka energije vjetra u drugoj polovici 20. stoljeća. Moderne vjetroelektrane klasificiraju se prema orijentaciji osovine i osi rotacije [6].

Turbina s osovinom postavljenom vodoravno, paralelno s tlom poznata je kao horizontalna (HAWT), dok druga vjetroturbina ima normalnu osovinu, no vertikalnu os vrtnje (VAWT).



Slika 1.17. Vjetroturbine s različitim osima vrtnje a) vertikalna b) horizontalna [6]

Dvije konfiguracije prepoznatljivih konstrukcija rotora, od kojih svaka ima svoje povoljne karakteristike. Usporeni *mainstream* razvoj VAWT-a može se pripisati niskoj brzini vrtnje i poteškoćama u kontroli brzine rotora. Poteškoće u pokretanju također su ometale razvoj vertikalnih turbina za koje se donedavno smatralo da nisu sposobne za samostalno pokretanje. Međutim, VAWT ne zahtijeva nikakav dodatni mehanizam za okretanje prema vjetru, kao ni tešku generatorsku opremu na tlu, čime se smanjuju opterećenja konstrukcije. Stoga, VAWT nije u potpunosti odbačen u budućem razvoju [6].

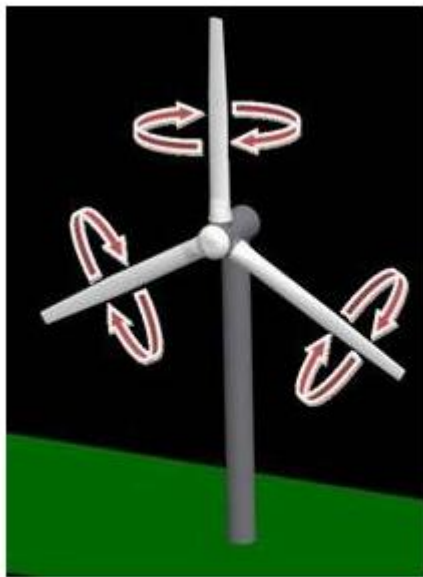
U tijeku je istraživanje novog VAWT dizajna rotora u obliku slova V (Slika 1.18.), koje iskorištava sve prednosti vertikalnih turbina, no za koje su potrebna dodatna istraživanja. Uzimajući u obzir sve navedene probleme alternativnih izvedbi vjetroturbina, popularnost HAWT-a možemo pripisati jednostavnoj kontroli brzine rotora kroz podešavanje nagiba lopatica. HAWT je stoga još uvijek najdominantnija konfiguracija koju danas koriste svi vodeći veliki proizvođači turbina [6].



Slika 1.18. V – vertikalna vjetroturbina [7]

Na slici 1.18. prikazana je vjetroturbina s lopaticama u obliku slova V. Ovo je nova izvedba vertikalne vjetroturbine na kojoj se još vrše istraživanja, no prednost su joj lopatice koje se zakreću. Kao i kod turbina s horizontalnim osima, zakretanjem lopatica direktno se postiže regulacija brzine vrtnje uz povećanu efikasnost jer ne zahtijeva opremu za okretanje u smjeru vjetra. Dodatna istraživanja potrebna su da bi se utvrdilo jesu li ovakve izvedbe sposobne za proizvodnju dostatnih količina energije [7].

Kod horizontalnih vjetroturbina postoji više metoda kontrole kako bi optimizirali ili ograničili izlaznu snagu. Turbina se može kontrolirati reguliranjem brzine vrtnje generatora, podešavanjem kuta lopatica ili rotacijom cijele vjetroturbine. Podešavanje kuta lopatica i rotacija turbine također je poznato kao kontrola nagiba i skretanja [8]. Vizualni prikaz podešavanja nagiba i skretanja prikazan je na slici 1.19.

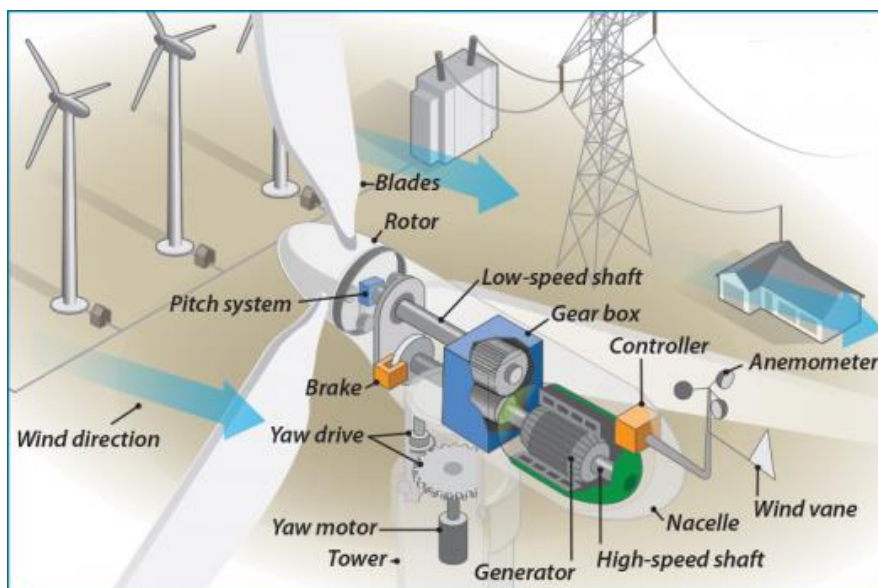


a) kontrola lopatica



b) skretanje turbine

Slika 1.19. Upravljanje horizontalnom vjetroturbinom [8]



Slika 1.20. Prikaz dijelova turbine u presjeku [9]

## 2.4. Gubitci vjetroelektrane

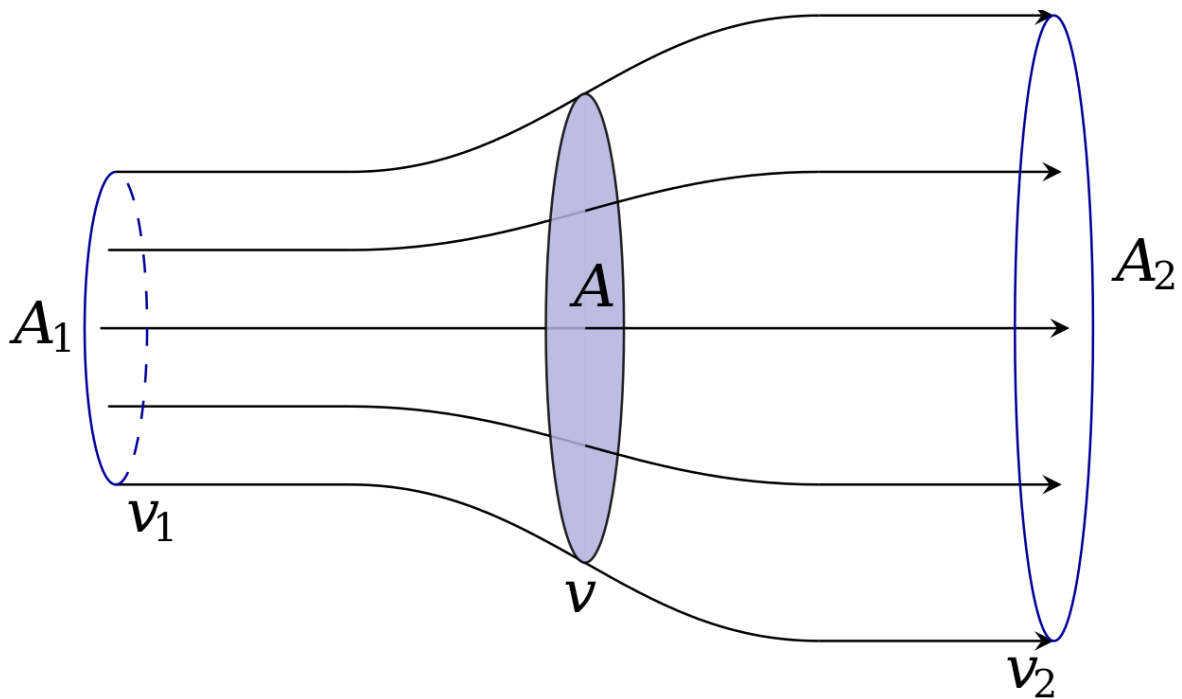
Visoka učinkovitost rotora poželjna je za povećanu proizvodnju energije vjetra i trebala bi biti maksimalno povećana do granica isplative proizvodnje. Energija ( $P_o$ ) koju vjetar posjeduje je kinetička te se računa prema izrazu (10).

Proces pretvorbe energije koji pretvara energiju vjetra u električnu energiju prolazi kroz tri glavna koraka pretvorbe, koji su redom aerodinamički, mehanički i električni korak pretvorbe. Na svakom koraku gubi se energija (2. zakon termodinamike), a konačna električna snaga je manja od ukupne snage vjetra s kojom se započelo [10]. Ovo nije jedinstveno samo za vjetar, svi elektroenergetski sustavi imaju gubitke.

## 2.5. Aerodinamički gubitci

Postoji fizička granica količine energije koja se može iskoristiti, a koja je neovisna od dizajna vjetroturbine. Proces proizvodnje energije iz vjetra podrazumijeva smanjivanje brzine vjetra preko vjetroturbine, što rezultira manjom kinetičkom energijom vjetra nakon prolaska kroz turbinu. Količina iskorištene energije direktno je u funkciji smanjenja brzine zraka iznad turbine. 100 % iskoristivosti značilo bi da je brzina vjetra nakon turbine nula, što ujedno označava i protok 0. Upravo zbog ovog razloga fizički je nemoguće iskoristiti svu kinetičku energiju vjetra. Ovaj princip je nešto što se uvelike prihvatilo, te se još naziva i Betzov zakon [11].

Betzov zakon ukazuje na maksimalnu snagu koja se može izvući iz vjetra, neovisno o dizajnu vjetroturbine. Fizičar Albert Betz objavio ga je 1919. godine. Zakon je izveden iz zakona očuvanja mase i momenta strujanja zraka koja teče kroz idealizirani disk, koji izvlači energiju iz vjetra. Prema Betzovom zakonu, nijedna turbina ne može uhvatiti više od 59,3 % kinetičke energije vjetra. Faktor  $C_p = 16/27$  (0,593) poznat je kao Betzov koeficijent. Praktične izvedbe vjetroturbina postižu vrhunac od 75 % do 80 % Betzovog limita [11].



Slika 1.21. *Betzov difuzor [11]*

Betzov zakon vrijedi za sve Newtonove fluide, uključujući vjetar. Ako bi sva energija koja dolazi od kretanja vjetra kroz turbinu bila iskorištena kao korisna energija, brzina vjetra nakon toga pala bi na nulu. Ako se vjetar prestane kretati na izlazu iz turbine, tada više ne može ući novi vjetar, pa bi prolazak bio blokiran. Da bi se vjetar kretao kroz turbinu, mora postojati neki protok vjetra s druge strane, s brzinom vjetra većom od nule. Betzov zakon pokazuje da zrak protječe kroz određeno područje, a kako se brzina vjetra usporava od gubitka energije zbog iskoristivosti od strane turbine, protok zraka mora se raspodijeliti na šire područje. Ovo daje rezultat da geometrija ograničava bilo koju učinkovitost turbine na maksimalno 59,3 % [11].

Najbolji pokazatelj ukupne učinkovitosti sustava vjetroagregata je stupanj aerodinamičke pretvorbe (koeficijent iskoristivosti). Pojam iskoristivosti obično se koristi za označavanje učinkovitosti cjelokupnog energetskeg sustava turbine. Ovaj odnos prikazan je u izrazu (21) te se općenito definira kao omjer električne energije proizvedene vjetroturbinom ( $P_{out}$ ) podijeljenom s energijom vjetra koja u turbinu ulazi.  $P_{in}$  predstavlja raspoloživu kinetičku energiju vjetra koja nikada u potpunosti nije dostupna (Betzov limit  $C_b = 0,593$ ) [10].

$$C_p = \frac{\text{proizvedena električna energija}}{\text{energija koja ulazi u turbinu}} = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (21)$$

Izraz se također može zapisati u obliku:

$$P_{out} = C_p * P_{in} \quad (22)$$

gdje se koeficijent  $C_p$  množi s ulaznom snagom  $P_{in}$  iz čega se može izračunati kolika je zapravo proizvedena energija pri zadanoj brzini vjetra [10]. U ovom slučaju mora se uvesti varijabla vjetra za što je potreban izraz za raspoloživu energiju, koji glasi:

$$P_{out} = C_p \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (23)$$

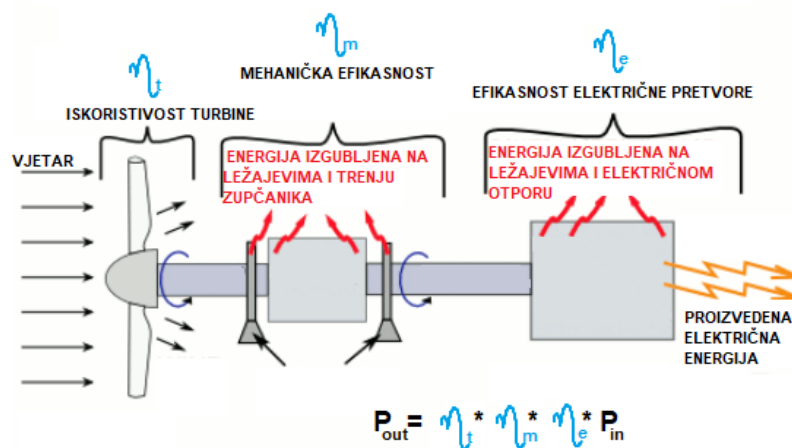
A predstavlja obuhvaćenu površinu koja je zapravo površina koju lopatice vjetroturbine obuhvaćaju te se za turbine s horizontalnom osi računaju kao površina kruga  $A = r^2\pi$ .  $\rho$  je koeficijent gustoće zraka u iznosu  $\rho=1,225 \text{ kg/m}^3$ , dok je  $v$  (m/s) brzina zraka [10].

### **Mehanički gubici**

U većini velikih turbina osovina turbine pokreće prijenosnik koji mijenja brzinu okretanja lopatica na brzinu koja najbolje odgovara generatoru (obično brže za veliku turbinu). Čak i najbolji zupčanci imaju trenje i ovdje se gubi nešto energije. Osim toga, postoje veliki ležajevi koji podupiru osovinu koja također uvodi malo trenja. Sve gubitke mehaničkih komponenti nazivamo mehaničkom učinkovitošću [10].

### **Električni gubici**

Električna učinkovitost odnosi se na to da osovina preko zupčanika okreće alternator ili generator koji pretvara mehaničku energiju u električnu. U ovom trenutku, struja može biti istosmjerna ili izmjenična, ovisno o tome je li spojena na DC generator ili alternator. Kod ovog koraka dolazi do dodatnih gubitaka jer generirana struja nije željenih frekvencija 50 ili 60 Hz pa je potrebna dodatna elektronika. Kao što je prikazano na crtežu iznad,  $C_p$  je mjera ukupne učinkovitosti sustava specifične vjetroturbine, kombinirajući učinkovitost rotora lopatica, mehaničkih i električnih sustava [10].



Slika 1.14. Tok energije kod velikih vjetroturbin [10]

## 2.6. Nedostatci vjetroelektrana

Najočiglednija i velika prepreka za obnovljive izvore energije je trošak – posebno troškovi izgradnje i instaliranja vjetroelektrana. Kao i kod većine obnovljivih izvora energije, vjetroelektrane su iznimno jeftine za održavanje, tako da se većina troškova odnosi na tehnologiju i proces proizvodnje.

Mjesta s najvećom potencijalnom energijom vjetra obično se nalaze na udaljenim mjestima daleko od gradova gdje je ona potrebna. Ovo predstavlja problem za prijenosni sustav koji mora biti izgrađen da bi se prenijela električna energija, što stvara dodatne troškove.

Također postoji i problem zemljišta blizu većih gradova jer proizvodnja energije ne mora biti najprofitabilnija upotreba zemljišta. Zemljište pogodno za postavljanje vjetroturbin možda bi moglo biti bolje iskorišteno u alternativne svrhe.

Turbine mogu uzrokovati buku i narušavati izgled krajolika. Iako vjetroelektrane imaju relativno mali utjecaj na okoliš u usporedbi s konvencionalnim elektranama, postoji zabrinutost zbog buke koju stvaraju lopatice turbine i vizualnih utjecaja na krajolik.

Lopatice turbine mogu oštetiti lokalnu divljač. Iako je većina ovih problema uvelike smanjena razvojem tehnologije te pravilnim postavljanjem vjetroelektrana, ptice se i dalje povremeno zalijeću u lopatice turbina.



### 3. Planiranje vjetroelektrane

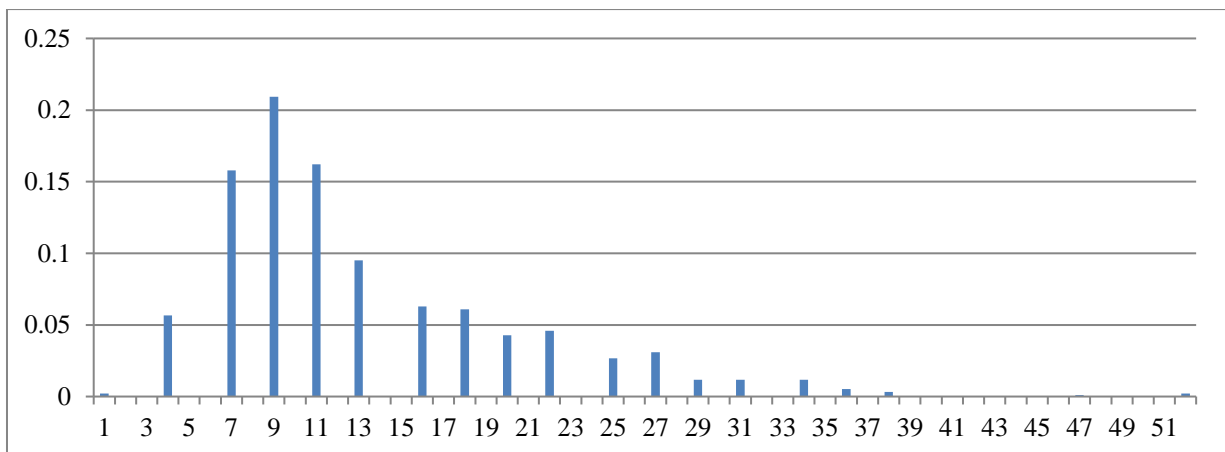
#### 3.1. Odabir lokacije

U radu će se promatrati vjetar na teoretskoj lokaciji u području oko Splita jer, kao što se vidi iz slike 1.4., Splitsko-dalmatinska županija ima vrlo dobar potencijal za proizvodnju električne energije iz vjetra. Uzeti su podaci s meteorološke postaje Split – Marjan u proteklih dvije godine i sedam mjeseci.

Tablica 1.1. *Histogram izmjerenih srednjih vrijednosti vjetra na meteorološkoj postaji Split – Marjan u razdoblju od 31 mjesec [12]*

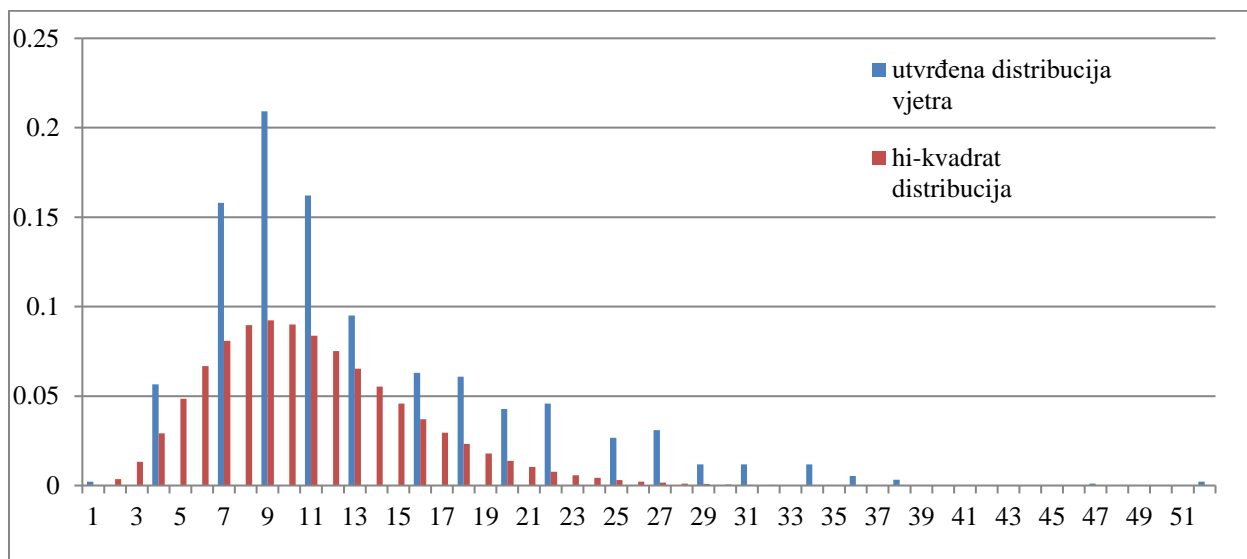
Brzina vjetra [m/s]	1	4	7	9	11	13	16	18	20	22	25	27	29	31	34	36	38	47	52
Frekvencija	2	53	148	196	152	89	59	57	40	43	25	29	11	11	11	5	3	1	2

Pomoću frekvencija za pojedine brzine vjetra iz spomenutih je podataka dobiven graf relativnih brzina vjetra kao na slici 1.6.

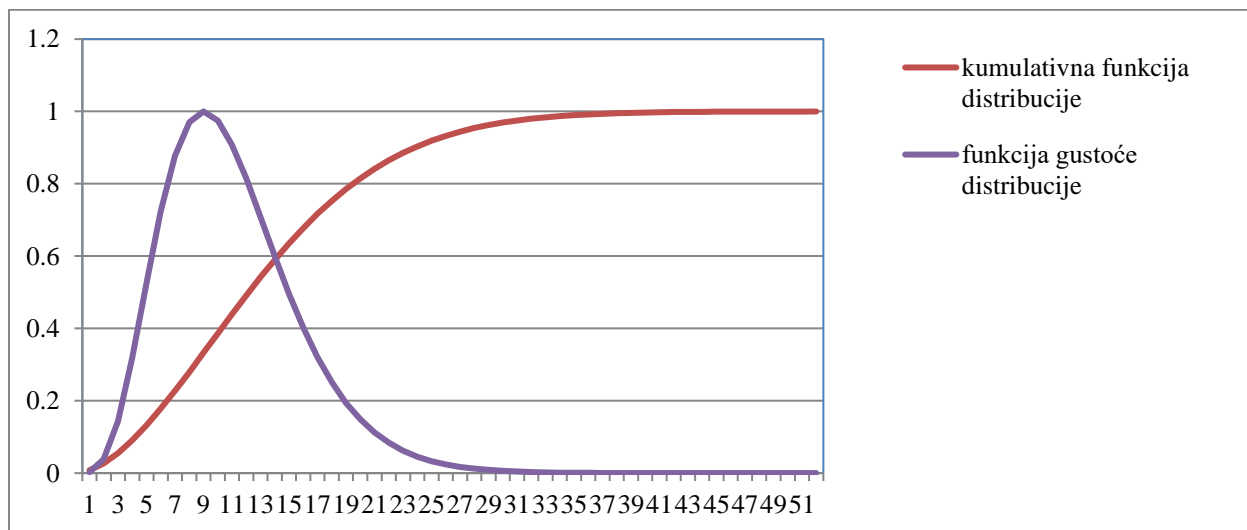


Slika 1.6. *Graf relativnih vrijednosti brzina vjetra na meteorološkoj postaji Split – Marjan u razdoblju od 31 mjesec*

Dobiveni rezultati grafa nalikuju  $\chi^2$ -razdiobi kao što se vidi na slici 1.8.



Slika 1.7. Graf utvrđene distribucije vjetra u usporedbi s hi-kvadrat distribucijom



Slika 1.8. Graf kumulativne i funkcije gustoće odabrane razdiobe

### 3.2. Statistička analiza podataka

Dobivena empirijska razdioba aproksimirat će se prikladnom teorijskom razdiobom. Budući da spomenuta empirijska razdioba najviše nalikuje  $\chi^2$ -razdiobi, njome ćemo ju i uspoređivati. Da bi dokazali kako je funkcija uistinu slična pretpostavljenoj teorijskoj  $\chi^2$ -funkciji koristit će se Kolmogorov-Smirnov test.

Kolmogorov-Smirnov test je ispitivanje jednakosti kontinuiranih razdioba vjerojatnosti koji se koristi za usporedbu uzorka s teorijskom distribucijom ili usporedbu dva uzorka [13].

Statistika Kolmogorov-Smirnov testa kvantitativno određuje udaljenost između kumulativnih funkcija empirijske distribucije uzorka i teorijske distribucije ili između empirijske distribucije funkcija dva uzorka. Nulta hipoteza pretpostavlja da je empirijska funkcija distribuirana jednako teorijskoj ili da su dvije funkcije jednakih distribucija, pri čemu se koristi odabrana razina značajnosti.

Ispostavi li se da je nulta hipoteza ( $H_0$ ) istinita, može se zaključiti da je, uz razinu značajnosti 0,05, empirijska razdioba iste distribucije kao pretpostavljena teorijska  $\chi^2$ . Alternativnu hipotezu  $H_1$  prihvaćamo u slučaju da odbacimo  $H_0$  što znači da su dvije distribucije međusobno različite.

Matematički:

$$H_0 \dots F(x) = F_0(x), \quad H_1 \dots F(x) \neq F_0(x) \quad (1)$$

Testna veličina D, kojom se određuje prihvaća li se ili odbacuje nulta hipoteza, jednaka je najvećoj apsolutnoj razlici empirijske funkcije distribucije i teorijske funkcije distribucije:

$$D_1 = SUP |F_0(x) - F_0(x)| \quad (2)$$

Da bi se izbjegla moguća pogreška izbora vrijednosti najveće razlike, izračunava se i sljedeća najveća razlika:

$$D_2 = \text{SUP } |F_0(x_{i-1}) - F_0(x_i)| \quad (3)$$

Tablica 1.2. Razlike kumulativnih funkcija po Kolmogorov-Smirnovljevom testu [13]

Razred	frekvencija $f_p$	Teoretska funkcija distribucije $F(x_i)$	Empirijska funkcija distribucije $F_o(x_i)$	$ F_o - F_x $	$ F_o(x_{i-1}) - F_x(x_i) $
4	55	0,030082976	0,058697972	0,028614996	0,030082976
7	148	0,200916499	0,216648879	0,015732381	0,142218526
9	196	0,378107669	0,425827108	0,047719439	0,161458789
11	152	0,556736722	0,588046958	0,031310237	0,130909614
13	89	0,706674591	0,68303095	0,023643641	0,118627632
16	59	0,85886912	0,745997866	0,112871254	0,17583817
18	57	0,918419386	0,806830309	0,111589077	0,172421521
20	40	0,954659326	0,849519744	0,105139582	0,147829016
22	43	0,975626756	0,895410886	0,08021587	0,126107012
25	25	0,990883319	0,922091782	0,068791537	0,095472433
27	29	0,995404769	0,953041622	0,042363147	0,073312987
29	11	0,997730039	0,964781217	0,032948823	0,044688417
31	11	0,998898457	0,976520811	0,022377646	0,034117241
34	11	0,999638309	0,988260406	0,011377904	0,023117498
40	8	0,999921764	0,996798292	0,003123471	0,011661358
52	3	0,999999727	1	2,72643E-07	0,003201435

Konačna vrijednost test veličine je veća vrijednost razlike ovih dvaju veličina, odnosno  $D = \max\{D_1, D_2\}$ .

U našem slučaju:  $D_1 = 0,1128713$ ,  $D_2 = 0,175838 \Rightarrow D = 0,175838$

Iz tablice 1.3. iščitava se kritična testna vrijednost  $D_k$ , uz razinu značajnosti  $\alpha = 0,05$  i broj razreda  $n = 16$ :

$$D_k = 0,328$$

Odluka se donosi usporedbom testne veličine  $D$  s odgovarajućom vrijednosti ( $D_k$ ) iz tablice Kolmogorov-Smirnov distribucije. Ako je testna veličina veća od kritične vrijednosti koja dijeli područje prihvatanja od područja neprihvatanja nulte hipoteze, nulta hipoteza se odbacuje [13].

$D_k = 0,328 < D = 0,175838$  – zaključuje se da je kritična vrijednost veća od testne vrijednosti, stoga prihvaćamo nultu hipotezu da se radi o dvije razdiobe istih distribucija.

Tablica 1.3. *Kritične vrijednosti za Kolmogorov-Smirnovljev test [13]*

$n$	$\alpha$	0.20	0.15	0.10	0.05	0.01
1		0.900	0.925	0.950	0.975	0.995
2		0.684	0.726	0.776	0.842	0.929
3		0.565	0.597	0.642	0.708	0.828
4		0.494	0.525	0.564	0.624	0.733
5		0.446	0.474	0.510	0.565	0.669
6		0.410	0.436	0.470	0.521	0.618
7		0.381	0.405	0.438	0.486	0.577
8		0.358	0.381	0.411	0.457	0.543
9		0.339	0.360	0.388	0.432	0.514
10		0.322	0.342	0.368	0.410	0.490
11		0.307	0.326	0.352	0.391	0.468
12		0.295	0.313	0.338	0.375	0.450
13		0.284	0.302	0.325	0.361	0.433
14		0.274	0.292	0.314	0.349	0.418
15		0.266	0.283	0.304	0.338	0.404
16		0.258	0.274	0.295	0.328	0.392
17		0.250	0.266	0.286	0.318	0.381
18		0.244	0.259	0.278	0.309	0.371
19		0.237	0.252	0.272	0.301	0.363
20		0.231	0.246	0.264	0.294	0.356
25		0.210	0.220	0.240	0.270	0.320
30		0.190	0.200	0.220	0.240	0.290
35		0.180	0.190	0.210	0.230	0.270

Da bi uspješno modelirali proizvodnju na željenoj lokaciji potrebno je aproksimirati našu empirijsku razdiobu jednom od funkcija gustoće: gama, logaritamskom, Rayleigh ili Weibull funkcijom pa će se one i usporediti. Ove funkcije obično se koriste u opisivanju karakteristika brzina vjetra na određenoj lokaciji.

### 3.2.1. Gama distribucija

Prve statističke studije o brzini vjetra provedene su prije otprilike 65 godina, a te su studije smatrale da je brzina vjetra diskretna slučajna varijabla te su je modelirali pomoću Gama distribucije. Gama funkcija prikladna je za opisivanje distribucije brzine vjetra na površini u većem dijelu Europe. Ova distribucija predstavlja zbroj eksponencijalnih funkcija raspodijeljenih kao slučajne varijable, a njezina funkcija gustoće sadrži faktor oblika  $\alpha$ , faktor skale  $\beta$  i brzinu vjetra  $\gamma$  [14].

$$f(x) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)\beta^\alpha} x^{\alpha-1} \exp\left(-\frac{x}{\beta}\right) \quad (4)$$

$$F(x) = \frac{\gamma\left(\alpha, \frac{x}{\beta}\right)}{\Gamma(\alpha)} \quad (5)$$

### 3.2.2. Logaritamska distribucija

Logaritamska funkcija nalazi primjenu u mnogim područjima, kao što su poljoprivreda, entomologija, ekonomija, geologija, kontrola kvalitete i slično. Utvrđeno je da dobro aproksimira rezultate u statističkim analizama i analizama vjerojatnosti [14]. Funkcija gustoće i kumulativna funkcija dane su izrazima (6) i (7).

$$f_{\ln}(v) = \frac{1}{v\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \frac{-(\ln v - \mu)^2}{2\sigma^2} \quad (6)$$

$$F(v) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[ -\frac{\ln v - \mu}{\sigma\sqrt{2}} \right] \quad (7)$$

$$\bar{X}(vi) = \frac{1}{2} [\sum_{i=1}^n vi] \quad (8)$$

$$\operatorname{var}(vi) = \frac{1}{n} [\sum_{i=1}^n (vi - \bar{X}(vi))^2] \quad (9)$$

Gdje je  $v \geq 0$  brzina vjetra (m/s),  $\sigma > 0$  logaritamski parametar oblika,  $\mu > 0$  je faktor skale, a  $\operatorname{erfc}$  Gaussova funkcija pogreške.

Kada se izračuna srednja vrijednost  $\bar{X}$  i varijanca  $\operatorname{var}(vi)$  promatrane brzine vjetra pomoću izraza (3) i (4), tada se može odrediti  $\sigma$  i  $\mu$  pomoću izraza (10) i (11).

$$\sigma = \sqrt{\ln \left( 1 + \frac{\operatorname{var}(vi)}{\bar{X}(vi^2)} \right)} \quad (10)$$

$$\mu = \ln vm - \frac{1}{2} \ln \left( 1 + \frac{\operatorname{var}(vi)}{\bar{X}(vi^2)} \right) \quad (11)$$

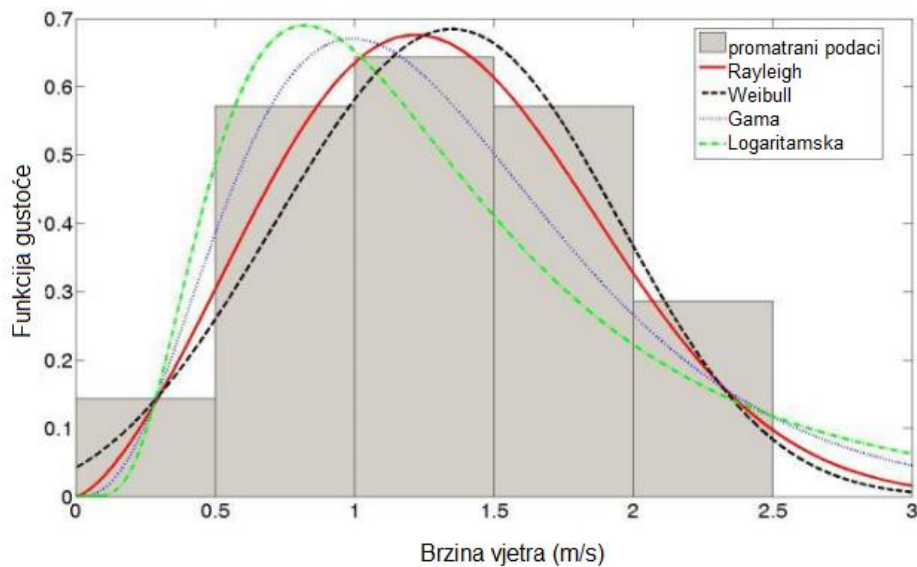
### 3.2.3. Rayleighova distribucija

Model funkcije gustoće i kumulativne funkcije za ovu distribuciju dani su izrazima (12) i (13),

$$fR(\gamma) = \frac{2\gamma}{\beta} e^{-\left(\frac{\gamma}{\beta}\right)^2} \quad (12)$$

$$Fr(\gamma) = 1 - e^{-\left(\frac{\gamma}{\beta}\right)^2} \quad (13)$$

gdje za Rayleighovu distribuciju vrijedi  $\alpha = 2$ . Jedna velika prednost ove distribucije nad Weibullovom je ta što se funkcija gustoće, kao i kumulativna funkcija, može dobiti poznavanjem samo srednje brzine vjetra, dok Weibull zahtijeva i parametar oblika te parametar skaliranja [14].



Slika 1.9. Usporedba različitih distribucija u statističkoj analizi vjetra [14]

### 3.2.4. Weibull distribucija

U nastavku planiranja vjetroelektrane koristit će se Weibullova razdioba koja nam je potrebna u programu DIgSILENT u svrhu modeliranja prizvodnje.

Sezonske i godišnje varijacije brzine vjetra mogu se opisati funkcijama distribucije. Stewart i Essenwanger pokazali su da Weibull funkcija distribucije daje dobru analitičku aproksimaciju za frekvencijsku raspodjelu brzine vjetra blizu površine [14]. Funkcija gustoće kao i kumulativna funkcija Weibullove distribucije definirane su izrazima (14) i (15):

$$f_w(\gamma) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{\gamma}{\beta}\right)^{\alpha-1} \exp\left[-\left(\frac{\gamma}{\beta}\right)^\alpha\right] \quad (14)$$

$$F_w(\gamma) = \exp\left[-\left(\frac{\gamma}{\beta}\right)^\alpha\right] \quad (15)$$

gdje je  $\alpha > 0$  faktor oblika,  $\beta > 0$  faktor skale i  $\gamma$  kao brzina vjetra. Parametri skaliranja i položaja su varijable dimenzija (m/s), dok je parametar oblika bez dimenzija. U slučaju  $\gamma = 0$  dobiva se dvoparametarska verziju distribucije [14]. Odnos parametra  $\beta$  i srednje brzine vjetra vidi se:

$$x = \beta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \quad (16)$$

gdje  $\Gamma$  predstavlja gama funkciju.

Kada se poznaju svi faktore Weibullove razdiobe mogu se odrediti parametri turbine. Ovdje su važne dvije brzine vjetra: brzina s najvećom vjerojatnošću  $v_{mf}$  (m/s) i optimalna brzina vjetra  $v_{op}$  (m/s). Ove dvije brzine mogu se odrediti kada su poznati Weibullovi parametri  $\beta$  i  $\alpha$ . Najvjerojatnija brzina je najčešća brzina vjetra za određenu razdiobu vjerojatnosti vjetra i jednaka je izrazu (17). Brzina koja nosi maksimalnu energiju vjetra može se izraziti



jednadžbom (18). Mjesto za vjetroturbinu treba odabrati tako da maksimalna brzina bude što bliže  $v_{op}$ . Ovime se postiže veća izlazna snaga turbine na vjetar, a samim time i proizvodni kapacitet [15].

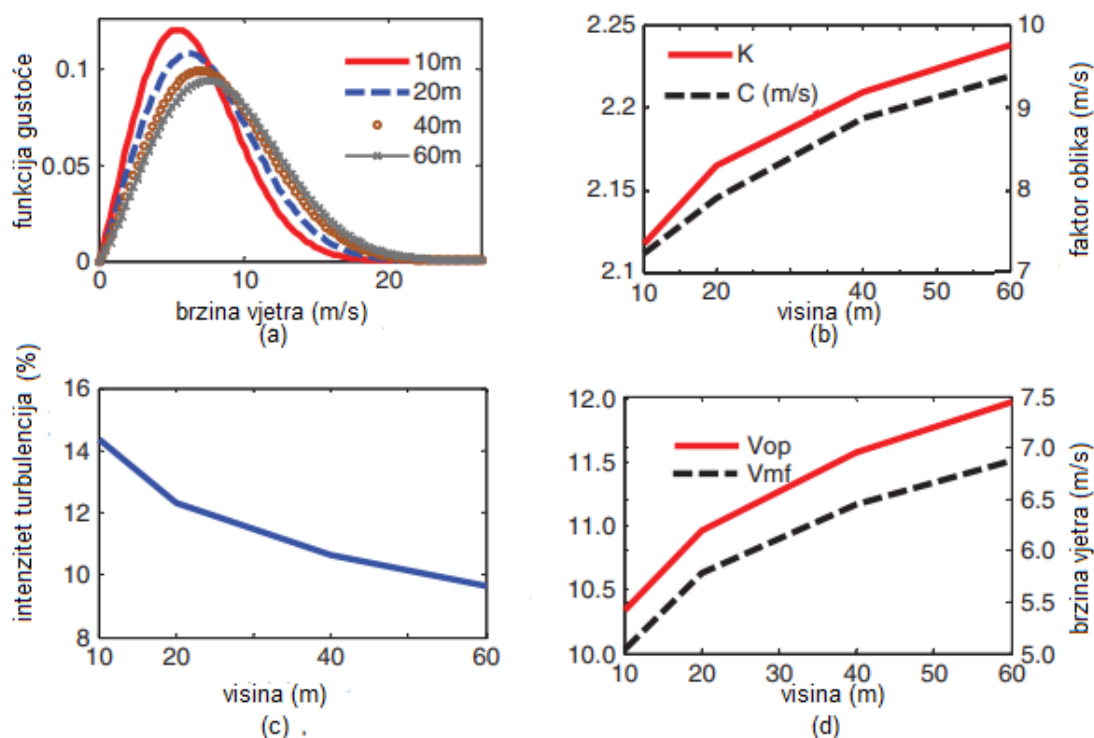
$$vmf = \beta \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (17)$$

$$vop = \beta \left(\frac{\alpha+2}{\alpha}\right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (18)$$

Anemometri za mjerenje vjetra najčešće su postavljeni na visinama koje ne predstavljaju preciznu lokaciju vjetroturbine, što može dovesti do krivog odabira turbine. Da bi izbjegli moguće greške, vrši se preračunavanje brzine vjetra s visine na kojoj se nalazi anemometar na željenu visinu turbine. Izračun te brzine dobiva se izrazom (19) [16]:

$$v2 = v1 \left(\frac{H2}{H1}\right)^m \quad (19)$$

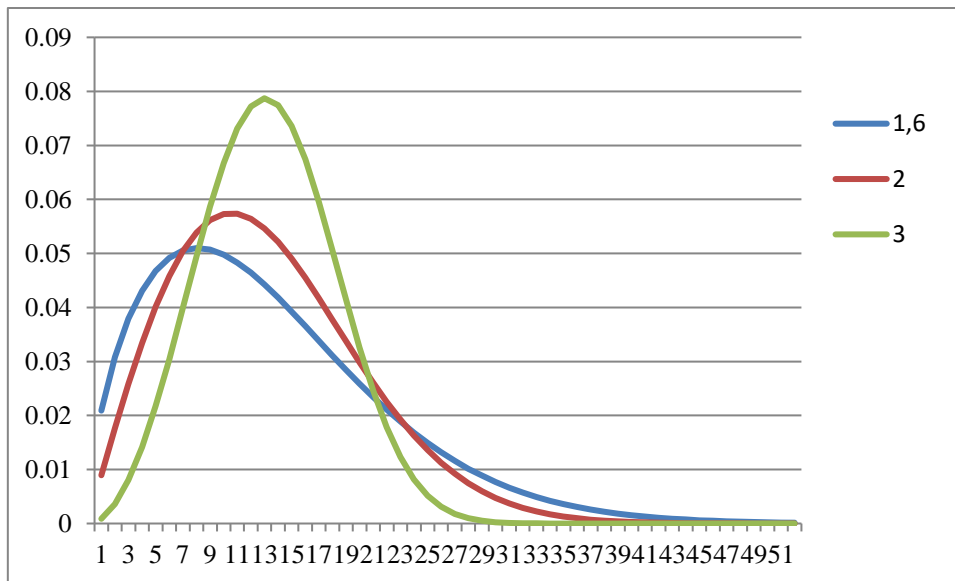
gdje je  $v_2$  brzina vjetra na visini  $H_2$  koja se traži, a  $v_1$  izmjerena početna brzina vjetra na visini anemometra  $H_1$ . Rezultati prikazani na slici (1.10.) pokazuju ovisnost faktora oblika i faktora skale o visini, parametri se visinom povećavaju. Intenzitet turbulencija smanjuje se porastom visine što je i očekivano, jer je na otvorenim prostorima lakši protok zraka u odnosu na tlo, gdje velik utjecaj na protok ima topografija zemljišta [16].



Slika 1.10. Utjecaj visine na parametre Weibull distribucije

(a) funkcija gustoće (b) faktor oblika (c) intenzitet turbulencija (d) brzina vjetra [17]

Također, primjećuje se da se množenjem kumulativne funkcije Weibull distribucije (10) brojem sati u godini dobiva vremenska krivulja. Pomoću vremenske krivulje može se odrediti broj sati u godini kada vjetar premašuje zadanu brzinu vjetra koja je prevelika za rad vjetroelektrane. Faktor oblika također je vrlo bitan jer pomoću njega direktno možemo odrediti topologiju odabranog mjesta. Njegove vrijednosti kreću se u iznosu od oko 1,6 u planinskim, 2 u priobalnim predjelima, a doseže vrijednosti od 3 u područjima izloženima stacionarnim i periodičnim vjetrovima. Međutim, ne treba zanemariti niže vrijednosti faktora oblika jer on predstavlja potencijalno veću energiju. Manji faktor oblika predstavlja veći raspon brzina što se i vidi na slici 1.11. S obzirom da je generirana energija proporcionalna trostrukoj brzini vjetra, doprinos manje učestalih, no jakih vjetrova je značajan. Kod većeg raspona vjetrova potrebno je izvršiti pravilan odabir vjetroturbine jer o njenom radnom području ovisi ukupan raspon iskorištenih vrijednosti brzina vjetra [16].



Slika 1.11. Graf ovisnosti Weibullove distribucije o faktoru oblika

Da bi izmjerenim vrijednostima vjetra pridružili Weibullovu distribuciju odgovarajućih parametara, pronašla se srednja brzinu vjetra iz podataka u tablici (1.1.) te je ona iznosila 13,28175 m/s. Brzina se potom iskoristila u gornjem izrazu (12) da bi se došlo do faktora skale  $\beta=14,93055$  m/s, uz pretpostavku da je faktor oblika  $\delta=2$ .

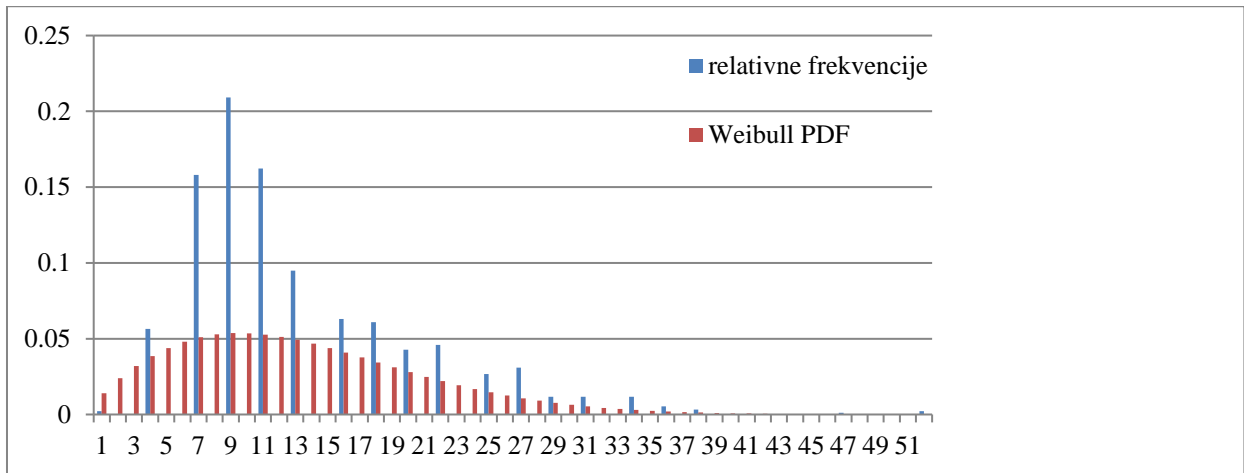
Da bi dobili parametre Weibullove razdiobe koja bi odgovarala proizvodnji za ovaj slučaj, odnosno pronašli odgovarajući parametar oblika  $\gamma$ , potrebno je izračunati snagu vjetra za sve brzine navedene u tablici (1.1.), te naći njihovu srednju vrijednost pomoću izraza:

$$P_o = \frac{1}{2} \rho A v_1^3 \quad (20)$$

Dobivena je prosječna snaga vjetra u iznosu  $\bar{P} = 3085,07098 \frac{W}{m^2}$ .

Koristeći prethodno dobivene podatke parametra skaliranja  $\beta=14,93055$  i parametra oblika  $\gamma=2$ , u programu Excel nacrtala se krivulja Weibullove razdiobe te za sve vrijednosti brzine vjetra u razdiobi izračunala snaga vjetra iz čega se na kraju pronašla srednja snaga vjetra. Da bi proizvedena snaga Weibull distribucije odgovarala mjerenjima, potrebno je izjednačiti ove

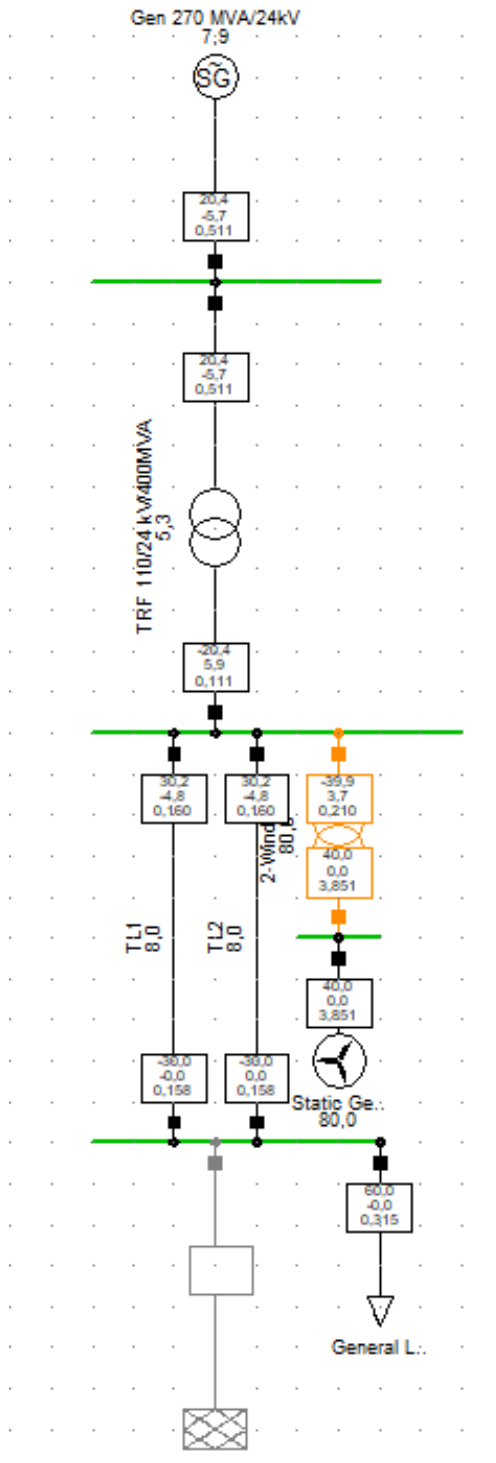
dvije srednje snage mijenjajući parametar oblika  $\gamma$ , koji se na kraju dobio iteracijom i iznosio  $\gamma = 1,788502$ . Dobiveni parametri razdiobe dalje će se koristiti za modeliranje proizvodnje vjetroelektrane u programu DIGSILENT.



Slika 1.12. Graf relativnih frekvencija s pripadajućom Weibull razdiobom

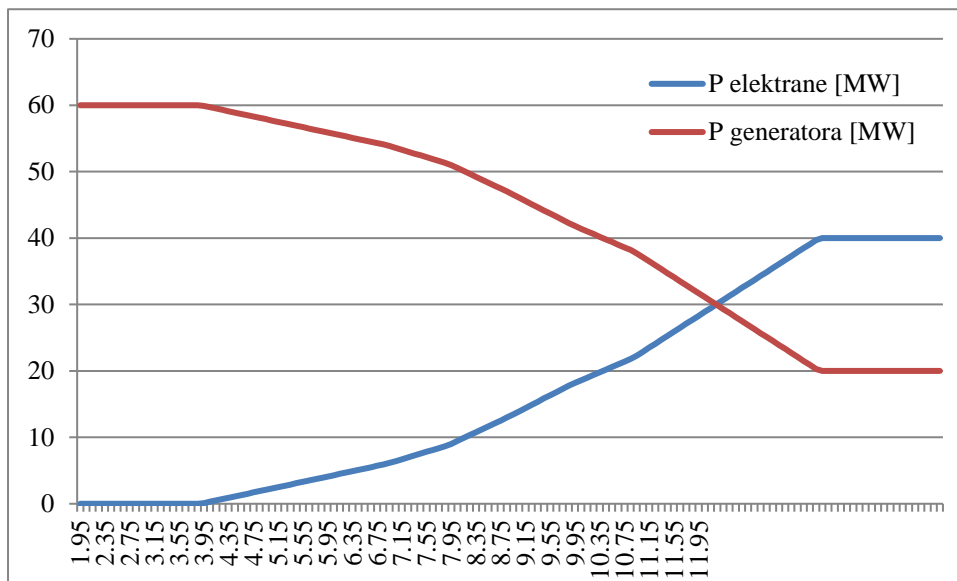
#### 4. Analiza rada vjetroelektrane

Parametri će se unijeti u jednostavan prijenosni sustav sa slike 1.13. s konvencionalnom proizvodnjom iz generatora, koji je preko uzlaznog transformatora spojen na 110 kV mrežu kao i odabranom vjetroelektranom s 10 paralelnih agregata. S druge pak strane, generator i vjetroelektrana trebaju pokriti potrošnju krute mreže te opterećenje od 60 MW. Sustav je izveden na način da generator nadomješta dio snage koji vjetroelektrana nije u mogućnosti proizvesti, ovisno o brzini vjeta. Generatori vjetroelektrane su snaga 5 MVA radne snage 4 MW.



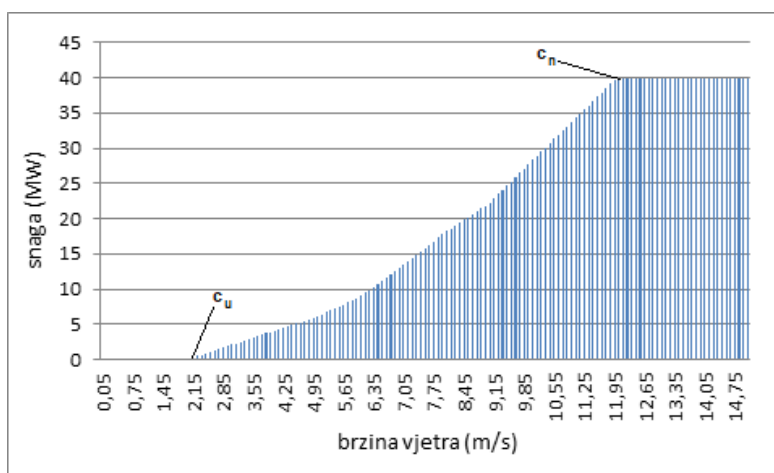
Slika 1.13. Model sustava s vjetroelektranom

Koristila se DPL skripta *Wind Park Analysis* gdje su se unijeli zadani parametri te analizirala proizvodnja i potrošnja za sve navedene brzine, a rezultati su vidljivi na slici 1.14.



Slika 1.14. Ovisnost proizvodnje generatora o proizvodnji vjetroelektrane

Vjetroelektrana s ovakvom razdiobom vjetra godišnje radi 6200 h punim kapacitetom, što je oko 260 dana godišnje, te proizvede 249000 MWh, dok je 105 dana proizvodnja slabija ili je vjetroelektrana izvan pogona zbog preslabog ili prejakog vjetra. Gubitci u sustavu javljaju se na uzlaznim transformatorima u iznosu 425 MWh godišnje.



Slika 1.15. Proizvodnja vjetroelektrane (MW) u ovisnosti o brzini vjetra (m/s)

Pri vrlo niskim brzinama vjetra nema dovoljno zakretnog momenta vjetra na lopatice turbine da bi ih okretali. Međutim, kako se brzina povećava, turbina će početi rotirati i generirati električnu energiju. Brzina pri kojoj turbina počinje s radom i generira snagu naziva se brzina uklopa i tipično je između 3 i 4 metra u sekundi. U našem slučaju ona iznosi  $c_u = 2,05$  m/s i označena je na slici 1.15.

### **Nazivna brzina $c_n$ .**

Kako se brzina vjetra povećava iznad brzine uklapanja, razina proizvedene električne energije brzo raste kao što je prikazano. Međutim, za brzine otprilike između 12 i 17 metara u sekundi, izlazna snaga doseže granicu za koju je sposoban električni generator. Ova granica izlazne snage generatora naziva se nazivna izlazna snaga, a brzina vjetra pri kojoj se postiže je nazivana brzina vjetra. Pri većim brzinama vjetra, konstrukcija turbine postavljena je tako da ograničava snagu do te maksimalne razine i nema daljnjeg porasta izlazne snage. Način na koji se to radi varira od dizajna do dizajna, ali tipično s velikim turbinama to se postiže podešavanjem kuta lopatica da bi se održala konstantna snaga. Nazivna brzina u našem slučaju iznosi  $c_n = 12$  m/s.

### **Brzina isključivanja $c_i$ .**

Kako se brzina vjetra povećava iznad nazivne, sile na strukturu turbine nastavljaju rasti i u nekom trenutku postoji rizik oštećenja rotora. Kao rezultat, koristi se kočioni sustav da se rotor zaustavi. To se naziva brzina isključivanja, a obično se kreće oko 25 metara u sekundi.

## **4.1. Usporedba podataka s drugih lokacija**

Spomenuto je da topografija utječe na brzinu vjetra. Usporedit će se par lokacija različitih topografija na različitim dijelovima svijeta te promatrati utjecaj na distribuciju vjetra. Odabrane su lokacije Taiz u Jamenu, Port Elizabeth u Južnoj Africi, gradovi u Turskoj – Afyon, Van, Sionp, Bozcaada i Silifke te Medellin u Kolumbiji.

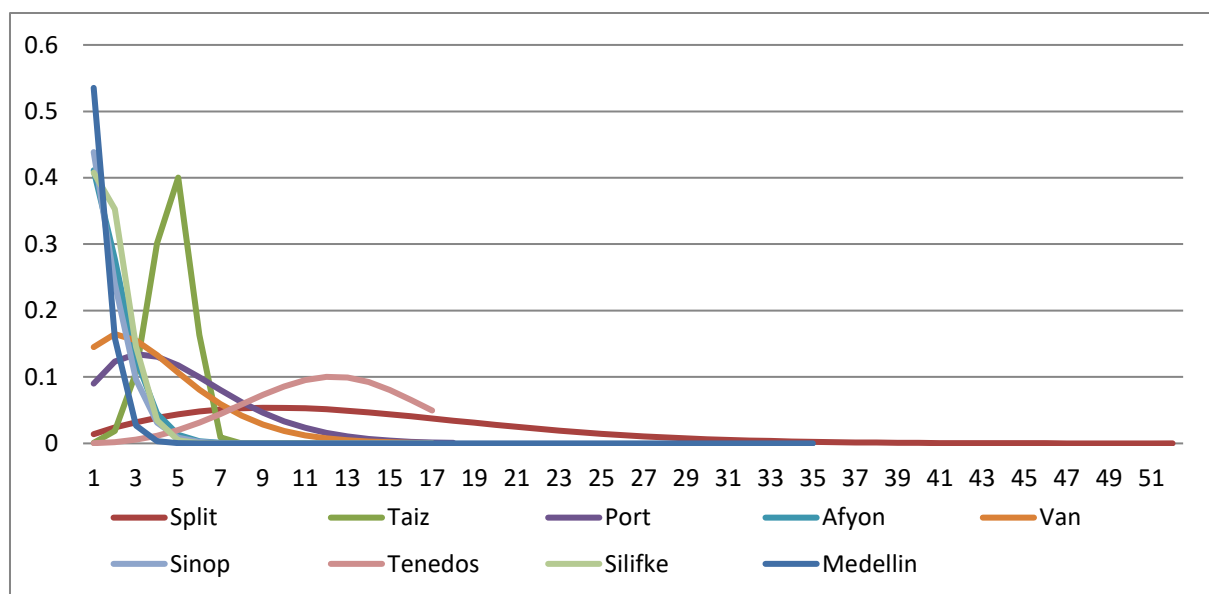
Taiz je grad na jemenskoj visoravni, udaljen oko sat vremena od čuvene luke Mokka na obalama Crvenog mora. Zanimljiv je zbog toga što leži na oko 1400 metara nadmorske visine, u podnožju „Planine strpljivosti“ visoke 3006 metara [18].

Port Elizabeth poznat i kao *windy city*, koji se nalazi na samom vrhu kontinenta gdje se spajaju Atlantski i Indijski ocean [19].

Gradovi Afyon, Van, Sinop, Bozcaada i Silifke pokrivaju sve dijelove Turske koja se nalazi između Sredozemnog i Crnog mora te Kaspijskog jezera, što bi trebalo rezultirati u manjim količinama vjetra sudeći po kartama trenutnih vrijednosti vjetra [14].

Tablica 1.4. Vrijednosti faktora Weibull distribucije na odabranim mjestima [15,16,17,20]

	faktor oblika	faktor skale	srednja brzina
Taiz	5,44	4,994	4,468
Port Elizabeth	1,629	5,696	5,099
Afyon	1,528	1,814	2,214
Van	1,465	4,5	4,228
Sinop	1,398	1,561	1,884
Bozcaada	3,539	13,543	9,065
Silifke	1,921	1,936	2,781
Medellin	1,468	1,097	0,51



Slika 1.16. Weibull funkcije gustoće vjetra u ovisnosni o njegovoj brzini (m/s)



Empirijske funkcije za gradove u Turskoj aproksimirane su Weibullovom funkcijom te dokazane testom hipoteza pomoću  $\chi^2$  i Kolmogorov-Smirnov testa.

Tablica 1.5. *Kritične vrijednosti Kolmogorov-Smirnov testa*

Mjerna stanica	Kritična vrijednost $D = 0.04$ ( $\alpha = 0.05$ )
Afyon	$0.025 < 0.04$ Prihvaća se nulta hipoteza
Van	$0.041 > 0.04$ Odbacuje se nulta hipoteza
Sinop	$0.014 < 0.04$ Prihvaća se nulta hipoteza
Tenedos	$0.095 > 0.04$ Odbacuje se nulta hipoteza
Silifke	$0.104 > 0.04$ Odbacuje se nulta hipoteza

Ovisno o topografiji mjesta primjećuje se da Weibullova razdioba nije pogodna za aproksimaciju određenih distribucija vjetra. Na primjer, Van je mjesto prilično brdovitog krajolika što predstavlja prepreku za vjetar te on ima više stohastički karakter.

Manje vrijednosti faktora oblika  $\gamma$  predstavljaju širi raspon brzina vjetra što znači i potencijalno veću eneriju. Može se vidjeti da Port Elizabeth, koji se nalazi na relativno otvorenoj lokaciji u kombinaciji s brdovitim zaleđem, ima širi raspon brzina vjetra, što znači i veći energetske potencijal te bi planiranje vjetroelektrane na takvoj lokaciji zahtijevalo turbinu s većim opsegom brzina. Taiz s druge strane, koji se nalazi na nadmorskoj visini od 3006 metara gdje vjetar nema prepreka, ima konstantnije brzine vjetra.

Tablica 1.6. *Godišnja proizvodnja elektrane na različitim lokacijama [15,16,17,20]*

	faktor oblika	srednja brzina	godišnja proizvedena energija (MWh)
Taiz	5,44	4,468	44 527
Port Elizabeth	1,629	5,099	80 000
Afyon	1,528	2,214	12400
Van	1,465	4,228	57 200
Sinop	1,398	1,884	8 750
Tenedos	3,539	9,065	203 900
Silifke	1,921	2,781	18 900
Split	1,788	13,281	249 000

U tablici 1.6. može se iščitati da su rezultati proizvodnje očekivani. Taiz ima veliki faktor oblika zbog visine na kojoj se nalazi pa je vjetar konstantan, no male je srednje brzine pa proizvodnja nije značajna. Port Elizabeth s druge strane, s malim faktorom oblika, no većom srednom brzinom, godišnje proizvede gotovo dvostruko u odnosu na Taiz. Split s manjim faktorom oblika i vrlo visokim srednjim brzinama vjetra proizvodi najviše zajedno s lokacijom u području Tenedosa, koji pak ima veći faktor oblik, što znači konstantnije srednje brzine vjetra.

## 5. Zaključak

Diplomskim radom opisali su se koraci koje je potrebno poduzeti pri planiranju buduće vjetroelektrane. Prva i najbitnija stavka je mjerenje vjetra na lokaciji te određivanje tehničke pristupačnosti. Bitno je proučiti i utjecaj na okolinu kao što su utjecaj na radare i ostale telekomunikacijske uređaje. Nakon odabira najpovoljnije lokacije koja zadovoljava sve gore navedene uvjete pristupa se detaljnijem ispitivanju. Odabrana lokacija je okolica Splita jer ima širok raspon brzina vjetra te najbolji potencijal energije vjetra u Hrvatskoj.

Nakon što su se prikupili podaci s meteorološke mjerne stanice, pristupilo se statističkoj analizi podataka. Podatke je zatim bilo potrebno razvrstati, odnosno napraviti histogram pomoću kojega se dobio graf funkcije gustoće vjetra na odabranoj lokaciji. Aproximirala se empirijska funkcija  $\chi^2$  distribucijom te dokazala njihova podudarnost Kolmogorov-Smirnov testom funkcija. Test se vrši usporedbom kumulativnih funkcija distribucija gdje se uspoređuje razlika između funkcija na svakom koraku (brzini). Uz željeni stupanj slobode ( $\alpha = 0,05$ ) odnosno s 95 %-tnom sigurnošću može se zaključiti da se empirijska i teoretska ( $\chi^2$ ) funkcija podudaraju.

Sljedećim se korakom distribucija aproximirala Weibullovom razdiobom koja je bila potrebna za daljnju analizu energije vjetra. Parametri Weibull distribucije koristili su se u programu DIgSILENT gdje se analizirala proizvodnja odabrane vjetroelektrane. Također se analiziralo par mjesta na ostalim dijelovima svijeta te su se rezultati usporedili s rezultatima ovog rada. Razlike u topografiji bile su vidljive u grafovima Weibull distribucije u smislu većeg ili manjeg ospega brzine vjetra. Mjesta sa širim rasponom brzina vjetra zahtijevaju i turbine s većim rasponom brzina u odnosu na mjesta s više-manje konstantim vjetrovima. Diplomski rad strukturiran je u četiri poglavlja. U prvom poglavlju opisuje se teorijska osnova mjerenja energije vjetra i projektiranja vjetroelektrane, kao i opis energija vjetra u Hrvatskoj. U idućem poglavlju nastavlja se sa statističkom analizom vjetra u Splitu gdje se aproximira funkcija teorijskom, te se dokazuje njihova podudarnost. Nadalje, unose se podaci u DIgSILENT te analiziraju proizvodnju odabrane vjetroelektrane i ostalih mjesta. U posljednjem poglavlju navode se gubitci te nedostaci vjetroelektrana.

## 6. Literatura

- [1] E. Jerkić, *Optimalno planiranje izgradnje vjetroelektrana*, 2-5, Zagreb, 2006.
- [2] E. Fitzpatrick, *AMP Capital consortium wins licence to run UK offshore wind farm*, RenewEconomy , Australija, 2013., dostupno na: <https://reneweconomy.com.au/amp-capital-consortium-wins-licence-to-run-uk-offshore-wind-farm-59417/> [29. kolovoza 2019.]
- [3] T. Benković, *Procjena potencijala energije vjetra u RH*, 2-5, Zagreb 2009.
- [4] *Vjetroelektrane u hrvatskoj*, Wikipedija, 2018., dostupno na: [https://hr.wikipedia.org/wiki/Vjetroelektrane\\_u\\_Hrvatskoj](https://hr.wikipedia.org/wiki/Vjetroelektrane_u_Hrvatskoj) [29. kolovoza 2019.]
- [5] *Vjetroelektrana Lukovac*, ING-GRAD, 2017., dostupno na: <https://www.ing-grad.hr/hr/projekti/energetika-i-infrastruktura/energetika/1260-vjetroelektrana-lukovac> [29. kolovoza 2019.]
- [6] P. J. Schubel, R.J. Crossley, *Wind Turbine Blade Design*, Faculty of Engineering, Division of Materials, Mechanics and Structures, University of Nottingham, University Park, Nottingham, 2012, dostupno na: [https://www.researchgate.net/publication/307687949\\_Wind\\_Turbine\\_Blade\\_Design](https://www.researchgate.net/publication/307687949_Wind_Turbine_Blade_Design) [29. kolovoza 2019.]
- [7] *Experimental vertical axis wind turbines*, Wind & Wet, dostupno na: <http://www.windandwet.com/windturbine/vawt1/vrotor1.php> [29.kolovoza 2019.]
- [8] *Wind Turbine Control Methods*, National Instruments, ožujak 2019., dostupno na: <https://www.ni.com/en-rs/innovations/white-papers/08/wind-turbine-control-methods.html> [29. kolovoza 2019.]
- [9] *The Inside of a Wind Turbine*, Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, Energy.gov, dostupno na: <https://www.energy.gov/eere/wind/inside-wind-turbine> [29. kolovoza 2019.]

- [10] D. Watson, *Wind Turbine Power Coefficient*, FT Exploring Science and Technology, dostupno na: <http://www.ftexploring.com/wind-energy/wind-power-coefficient.htm> [29. kolovoza 2019.]
- [11] *Betz's law*, Wikipedija, lipanj 2019., dostupno na: [https://en.wikipedia.org/wiki/Betz%27s\\_law](https://en.wikipedia.org/wiki/Betz%27s_law) [29. kolovoza 2019.]
- [12] *Meteorološka postaja Split-Marjan*, Neverin.hr, dostupno na: <https://www.neverin.hr/postaja/split-marjan/> [2. srpnja 2017.]
- [13] K. Blašković, *Test Kolmogorov-Smirnova*, Rijeka, 2017.
- [14] H. E. Akyuz, H. Gamgam, *Statistical Analysis of Wind Speed Data with Weibull, Lognormal and Gamma Distributions*, Bitlis Eren University, Faculty of Science and Arts, Department of Statistics, Bitlis, Turska, listopad 2017.
- [15] T. R. Ayodele, A. A. Jimoh, J. L. Munda, J. T Agee, *Statistical analysis of wind speed and wind power potential of Port Elizabeth using Weibull parameters*, Department of Electrical Engineering, Tshwane University of Technology, Pretoria, South Africa, 31-35, 2012.
- [16] M. H. Al Buhairi, *A statistical analysis of wind speed data and an assessment of wind energy potential in Taiz-Yamen*, Taiz University, Republic of Yemen, 24-27, listopad 2006.
- [17] A.-G. A. Jimoh, *Statistical Analysis of Wind Distribution and Wind Power Potential in the Coastal Region of South Africa*, International Journal of Green Energy, 817-829, rujan 2013.
- [18] *Taiz*, Wikipedija, travanj 2016., dostupno na: <https://sh.wikipedia.org/wiki/Taiz> [13. rujna 2019.]
- [19] *Port Elizabeth*, Wikipedija, rujan 2019., dostupno na [https://en.wikipedia.org/wiki/Port\\_Elizabeth](https://en.wikipedia.org/wiki/Port_Elizabeth) [13. rujna 2019.]
- [20] P.A. Amaya-Martínez, A.J. Saavedra-Montes, E. I. Arango-Zuluaga, *A statistical analysis of wind speed distribution models in the Aburrá Valley*, CT&F - Ciencia, Tecnología y Futuro, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Antioquia, Colombia, prosinac 2014.

## 7. Sažetak

Statistička analiza vjetra u svrhu modeliranja proizvodnje buduće vjetroelektrane uključuje prikupljanje podataka o brzinama vjetra u što većem mogućem vremenskom intervalu. Veći vremenski period znači i veću preciznost pri simuliranju proizvodnje elektrane. Vrlo je bitno precizno modelirati proizvodnju jer o njoj ovise svi ostali faktori vjetroelektrane, od konstrukcije do prodavanja same električne energije na tržištu.

Prikupili su se podatci vjetra za Split u intervalu od dvije i pola godine iz kojih su određene funkcije gustoće te kumulativne funkcije. Pri analizi vjetra obično se koriste četiri funkcije: gama, logaritamska, Rayleigh te Weibull distribucija. Iz podataka se direktno može vidjeti utjecaj topografije odabrane lokacije na distribuciju vjetra, a samim time i njenu proizvodnju. Brdoviti krajolici obično su manjeg faktora oblika čime se postiže širi opseg brzina vjetra, dok su krajolici s malo prepreka u topologiji većeg faktora oblika te konstantnijih brzina vjetra.

## 8. Abstract

Statistical analysis of wind for the purpose of modeling wind power generation requires gathering data of wind speeds in widest possible time period. Longer time periods correspond to greater precision when simulating the production of power plants. It is very important to model production precisely because all of the wind farm factors depend on it, from the construction of wind farm to selling the electricity on the market.

The probability density function and cumulative function were derived from time series data collected in 2.5 years for Split, Croatia. Four functions are most commonly used in wind analysis: gamma, logarithmic, Rayleigh and Weibull distributions. In this study we used Weibull distribution as it is most commonly used one amongst the four. We can see the influence of the topography directly from the data derived at each site as well as its influence on production. Mountainous landscapes usually result in smaller shape factor of Weibull distribution which means wider range of wind speeds. On the other hand, landscapes with little to no obstacles in the topography form a greater shape factor resulting in more constant wind speeds.

## 9. Životopis

Marko Prka rođen je 9. travnja 1993. u Virovitici. Trenutačno i prebiva u Virovitici gdje je završio osnovnu školu. Obrazovanje nastavlja 2008. godine u „Tehničkoj školi Virovitica” smjer elektrotehnika. Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija sveučilišta Josipa Juraja Strossmayera u Osijeku upisuje 2012. godine. Preddiplomski studij elektrotehnike završava 2015. godine sa završnim radom „Fotonaponske ćelije”, a te iste godine upisuje diplomski studije elektrotehnike smjera „Energetika” i odjela „DEA – Elektroenergetski sustavi”. Stručnu praksu odrađuje u elektroinstalacijskom obrtu „GATO automatika” u Virovitici.