

Određivanje energetskeg potencijala na temelju mjerenja brzine vjetra

Zečević, Ivan

Undergraduate thesis / Završni 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:200:214825>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-16**

Repository / Repozitorij:

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



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA**

Sveučilišni studij

**ODREĐIVANJE ENERGETSKOG POTENCIJALA NA
TEMELJU MJERENJA BRZINE VJETRA**

Završni rad

Ivan Zečević

Osijek, 2019.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. VJETAR KAO IZVOR ENERGIJE	2
2.1. Osnovne karakteristike vjetra	2
2.2. Energija i snaga vjetra	4
2.2.1. Energija vjetra	4
2.2.2. Snaga vjetra	5
2.3. Vjetar u Hrvatskoj i svijetu.....	8
3. MJERENJE I OPISIVANJE BRZINE VJETRA	10
3.1. Instrumenti za mjerenje brzine vjetra	10
3.1.1. Anemometri s lopaticama	10
3.1.2. Propelerni anemometri	11
3.1.3. Ultrazvučni anemometri	12
3.1.4. Laser doppler anemometri.....	12
3.1.5. Anemometri s ugrijanom žicom.....	13
3.2. Beaufortova ljestvica	13
3.3. Matematičke razdiobe za opisivanje brzine vjetra	15
3.3.1. Weibullova razdioba	15
3.3.2. Rayleighova razdioba.....	19
4. ANALIZA MJERNIH PODATAKA.....	21
5. ENERGETSKI POTENCIJAL VJETRA.....	27

5.1. Vjetroagregati	27
5.2. Određivanje energetskeg potencijala.....	29
5.2.1. Histogramska metoda	30
5.2.2. Metoda uz pomoć funkcije gustoće.....	34
6. ZAKLJUČAK	40
LITERATURA.....	41
ŽIVOTOPIS	42

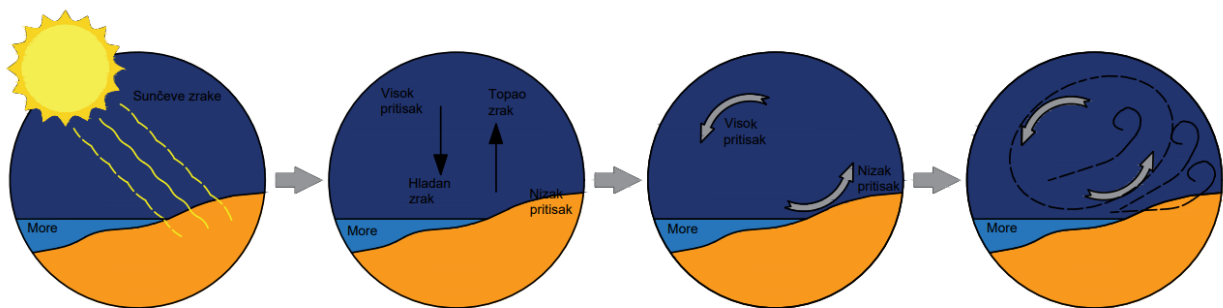
1. UVOD

Vjetar predstavlja jako pristupačan, čist i obnovljiv izvor energije. Upravo se zbog tih karakteristika vjetar kroz povijest koristio u mnoge svrhe. Prvo se koristio za plovidbu morem, nakon toga u poljoprivredi za pumpanje vode i mljevenje žitarica. Danas se taj izvor energije najčešće koristi za pretvorbu u električnu energiju na način da se kinetička energija vjetra na lopaticama turbina pretvara u mehaničku, koja se dalje u generatoru pretvara u električnu energiju. Kako je ovakva pretvorba energije jako učinkovita sve se više i više ulaže u njezino razvijanje, no i dalje nije dovoljno zastupljena. Vjetroelektrane pokrivaju samo 6% svjetskih potreba za električnom energijom. Kako bi se taj broj povećao potrebno je instalirati nove vjetroelektrane. No prije nego što se izgradi nova vjetroelektrana potrebno je prvo odrediti njezinu lokaciju. Lokacija se odabire tako što se prvo odredi energetska potencijal vjetra na toj lokaciji. Upravo određivanje tog potencijala je bio glavni zadatak ovog završnog rada. Proces određivanja energetske potencijala započinje mjerenjem brzine vjetra. Za mjerenje brzine vjetra odabrano je 5 lokacija u Republici Hrvatskoj, Orah, Zelovo, Promine, Smokovljani i otok Brač. Sve lokacije su smještene u priobalnom ili otočnom području. Nakon godinu i šest mjeseci mjerenja brzine vjetra, dobiveni rezultati se unose u software za analizu mjernih podataka vjetra, WINDOGRAPHER. U tom računalnom programu se vrši grupiranje brzine vjetra u proizvoljne vremenske intervale. Za ovu analizu uzet je interval od 1 m/s. Nakon toga se određuje frekventnost i vjerojatnost brzine vjetra na analiziranoj lokaciji, te određuje Weibullova razdioba koja je bitna za sljedeći korak određivanja energetske potencijala vjetra. Na temelju dobivenih rezultata pomoću dvije metode za određivanje potencijala se računa ukupna godišnja procijenjena proizvodnja električne energije na toj lokaciji. Ta godišnja procijenjena proizvodnja električne energije nam pokazuje da li ta lokacija ima povoljan potencijal ili ne. [1]

2. VJETAR KAO IZVOR ENERGIJE

2.1. Osnovne karakteristike vjetra

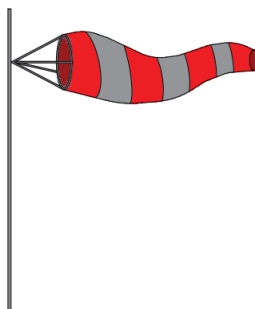
Vjetar se može opisati kao strujanje zračnih masa, najčešće vodoravno od zemljine površine. On nastaje zbog više razloga kao što su razlike tlaka između dvaju područja, temperature, rotacije Zemlje itd. Topliji zrak se uzdiže na više razine Zemljine atmosfere, te se usmjerava prema polovima i zakreće pod utjecajem Zemljine rotacije. Hladni zrak popunjava nastale praznine i na taj način uzrokuje stalne vjetrove. Strujanjem zraka dolazi do trenja, odnosno gubitka kinetičke energije u doticaju sa čvrstom podlogom, što rezultira razlikama u brzini strujanja.



Slika 1. Nastanak vjetra [2]

Vjetar se najčešće opisuje uz pomoć dvaju komponenata, a to su smjer i jačina, odnosno brzina. Smjerom vjetra se podrazumjeva ona strana svijeta na koju vjetar puše, a ona se određuje uz pomoć vjetrokaza ili vjetrulje, dok se jačina vjetra određuje i opisuje pomoću anemometra ili Beaufortove tablice.

Kao što je napisano, smjer vjetra se određuje uz pomoć vjetrokaza. Oni su najčešće postavljene na krovove kuća ili na neka druga povišena mjesta. Ta naprava je najčešće napravljena od vodoravne poluge na kojoj se nalazi strelica na jednoj strani i protuuteg na drugoj strani. Poluga se zakreće uz pomoć aerodinamične ploče postavljene okomito na nju. Vjetar zakreće ploču i uz pomoć smjera strelice odredimo smjer kretanja vjetra. Također postoje i ostale vrste vjetrokaza. Jedna od njih je i vjetrokaz u izvedbi s teksilnom cijevi.



Slika 2. Vjetrokaz u izvedbi s tekstilnom cijevi [2]

Jedna od najznačajnijih metoda prikaza smjerova vjetra jesu ruže vjetrova. Ruže vjetrova su grafički prikazi smjerova vjetra. Oni imaju oblik zvjezdastog dijagrama na kojem su prikazane četiri, osam ili dvanaest smjerova, koje predstavljaju zasebne strane svijeta (istok, zapad, sjever, jug itd.). Duljina svakog „šiljka“ na ružama vjetrova se odnosi na frekventnost vjetra koji puše u tom smjeru u određenom vremenskom intervalu. Također „šiljci“ mogu biti obojani različitim bojama koje predstavljaju brzinu vjetra. Prve ruže vjetrova potječu od Egipćana, a datiraju još od 1200 godina pr. n. e. Danas se najčešće primjenjuju u meteorologiji.

Druga veličina za opisivanje vjetra je brzina. Brzina vjetra se opisuje s tri veličine, srednjom, trenutnom i fluktuirajućom brzinom. Srednja brzina vjetra jest prosječna brzina vjetra u određenom vremenskom razdoblju. To vremensko razdoblje može biti od nekoliko minuta, nekoliko sati pa čak i od nekoliko mjeseci ili sezona. Nju određuju sezonske pojave. Fluktuirajuća komponenta brzine određuje longitudinalni intenzitet turbulencije, te tako opisuje stalnu promjenjivost brzine vjetra. Trenutačna komponenta brzine se računa formulom:

$$v_{trenutačna} = v_{srednje} + v_{fluktuirajuće} \quad (2-1)$$

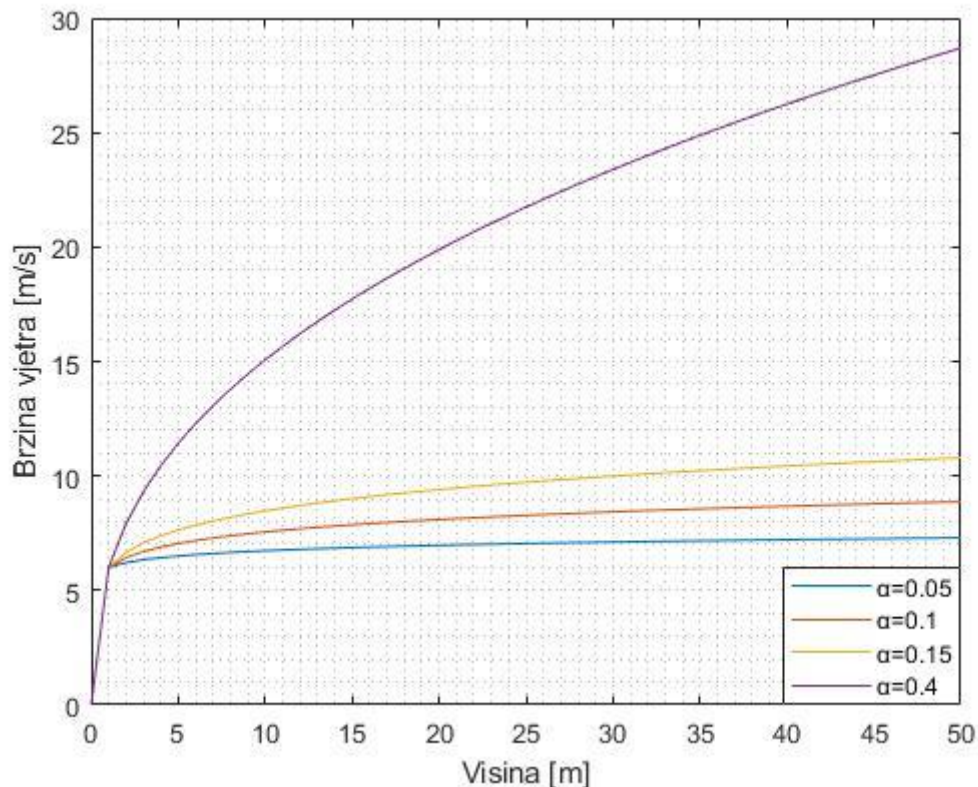
Jedno od glavnih svojstava vjetra je da on mijenja svoju brzinu ovisno o visini, točnije brzina se povećava kako visine rastu. Ta promjena brzine je jako bitna za procjenu energetskog potencijala vjetra. Ovo svojstvo vjetra se iskorištava u izgradnji vjetroelektrana, jer snaga vjetra ovisi o brzini, točnije o kubu brzine vjetra, što ćemo vidjeti u sljedećem poglavlju. Odnos visine i brzine vjetra je dat izrazom:

$$v = v_0 \cdot \left(\frac{H}{H_0}\right)^\alpha \quad (2-2)$$

pri čemu su:

- v_0 - mjerena brzina vjetra [m/s]
- H_0 - visina na kojoj je mjerena brzina vjetra v_0 [m]
- H - visina [m]
- v - brzina vjetra na visini H [m/s]
- α - koeficijent smicanja tla

Koeficijent smicanja tla ovisi o terenu kroz koje prolazi vjetar i on se kreće od 0 i više, pri čemu 0 predstavlja slučaj kod kojeg je teren idealno gladak i nema trenja, a viši koeficijenti predstavljaju slučaje kod kojih bi teren postupno zaustavljao vjetar. Neki od značajnijih iznosa koeficijenta smicanja tla su $\alpha = 0.1$ za vodu, te za tvrdo i glatko tlo, $\alpha = 0.15$ za travu, $\alpha = 0.4$ za područje sa zgradama. Slika 3 prikazuje upravo opisanu promjenu vjetra ovisno o visini.



Slika 3. Promjena brzine ovisno o visini pri $v_0 = 6$ m/s na $H_0 = 1$ m [3]

2.2. Energija i snaga vjetra

2.2.1. Energija vjetra

Energija koju vjetar ima predstavlja kinetičku energiju i ona ovisi o kvadratu brzine vjetra. Kinetička energija vjetra određene mase koji se kreće nekom brzinom se računa izrazom:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (2-3)$$

gdje je:

- E_k - kinetička energija vjetra [J]
- m - masa vjetra [m]
- v - brzina vjetra [m/s]

Ako masu vjetra predstavimo kao umožak gustoće ρ i volumena vjetra V tada će vrijediti da je:

$$m = \rho \cdot V \quad (2-4)$$

Odnosno vrijedi,

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V \cdot v^2 \quad (2-5)$$

Međutim, ova formula vrijedi samo za slučajeve kod kojih vjetar puše jednoliko, odnosno istom brzinom i u cijelom svom volumenu ima jednaku gustoću zraka. Za sve ostale slučajeve, kinetička energija se računa izrazom:

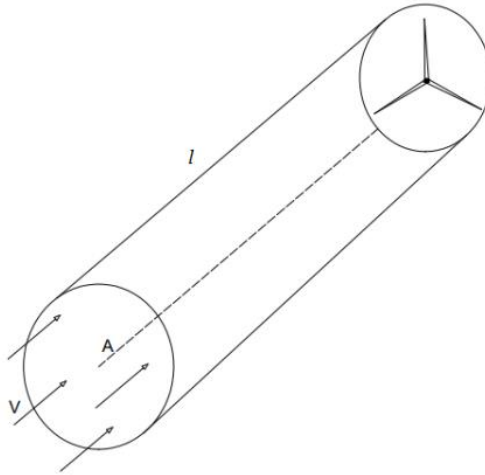
$$E_k = \int_0^t P(t) dt \quad (2-6)$$

gdje je:

- $P(t)$ - trenutna snaga vjetra [W]

2.2.2. Snaga vjetra

Snaga vjetra ovisno o svojim svojstvima se dijeli na teorijsku i na stvarnu snagu vjetra. Teorijska snaga vjetra se može predstaviti kao ulazna snaga na elise rotora, koja se dobije pretvaranjem sile vjetra u okretnu silu. Količina energije koju vjetar prenosi ovisi o volumenu cilindra vjetra. Taj volumen cilindra se može prikazati kao umnožak površine kruga A , koju čine elise rotora, i duljine cilindra l .



Slika 4. Cilindar vjetra [4]

Tada vrijedi da je:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^2 \cdot l = \frac{1}{2} \cdot q \cdot v \cdot l \quad (2-7)$$

Gdje q predstavlja protok zraka, a on je jednak:

$$q = \rho \cdot A \cdot v \quad (2-8)$$

Iz formule (2-6) se da primjetiti da je snaga vjetra derivacija energije po vremenu pa vrijedi izraz:

$$P = \frac{dE_k}{dt} = \frac{1}{2} \cdot q \cdot v \cdot \frac{dl}{dt} \quad (2-9)$$

$$P = \frac{1}{2} \cdot q \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v \cdot v^2 \quad (2-10)$$

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (2-11)$$

Može se primjetiti da teorijska snaga vjetra ovisi o gustoći zraka, površini kruga rotora te kubu brzine vjetra. Međutim ovaj izraz je veoma složen u primjeni kod vjetroelektrana, jer on ovisi o mnogo drugih faktora:

- Brzina vjetra je promjenjiva tijekom vremena
- Brzina vjetra ovisi i o visini

- Snaga vjetra ovisi o gustoći, a gustoća zraka ovisi o temperaturi, nadmorskoj visini, vlažnosti...

Prethodno opisane formule opisuju teorijsku snagu vjetra, odnosno one pokazuju idealan slučaj kada bi se zrak nakon prolaska kroz elise rotora u potpunosti zaustavio. Tada bi turbina preuzela svu tu energiju, odnosno snagu. Međutim, kinetička energija vjetra se ne može u potpunosti iskoristiti, jer vjetar mora i dalje strujati. Također jedan dio energije vjetra se troši i na trenje. Zbog tih razloga se uvodi pojam stvarne snage vjetra. Stvarna snaga dobivena na elisama rotora je proporcionalna razlici kvadrata dolazne brzine vjetra na ulazu rotora v i kvadrata odlazne brzine vjetra na izlazu rotora v_0 . Ta snaga je dana izrazom:

$$P = \frac{1}{2} \cdot q \cdot (v^2 - v_0^2) \quad (2-12)$$

Brzina vjetra je diskontinuirana, stoga protok zraka kroz elise rotora je izveden množenjem gustoće i površine kružnice koje opisuju elise sa srednjom brzinom:

$$q = \rho \cdot A \cdot \frac{v + v_0}{2} \quad (2-13)$$

Pa se tako dobija:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \left[\rho \cdot A \cdot \frac{(v + v_0)}{2} \right] \cdot (v^2 - v_0^2) \quad (2-14)$$

Gornji izraz se može pojednostaviti pa vrijedi:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot \frac{\left(1 + \frac{v_0}{v}\right) \cdot \left[1 - \left(\frac{v_0}{v}\right)^2\right]}{2} \quad (2-15)$$

Gdje je,

$$C_p = \frac{\left(1 + \frac{v_0}{v}\right) \cdot \left[1 - \left(\frac{v_0}{v}\right)^2\right]}{2} \quad (2-16)$$

Konačna formula za stvarnu snagu vjetra glasi:

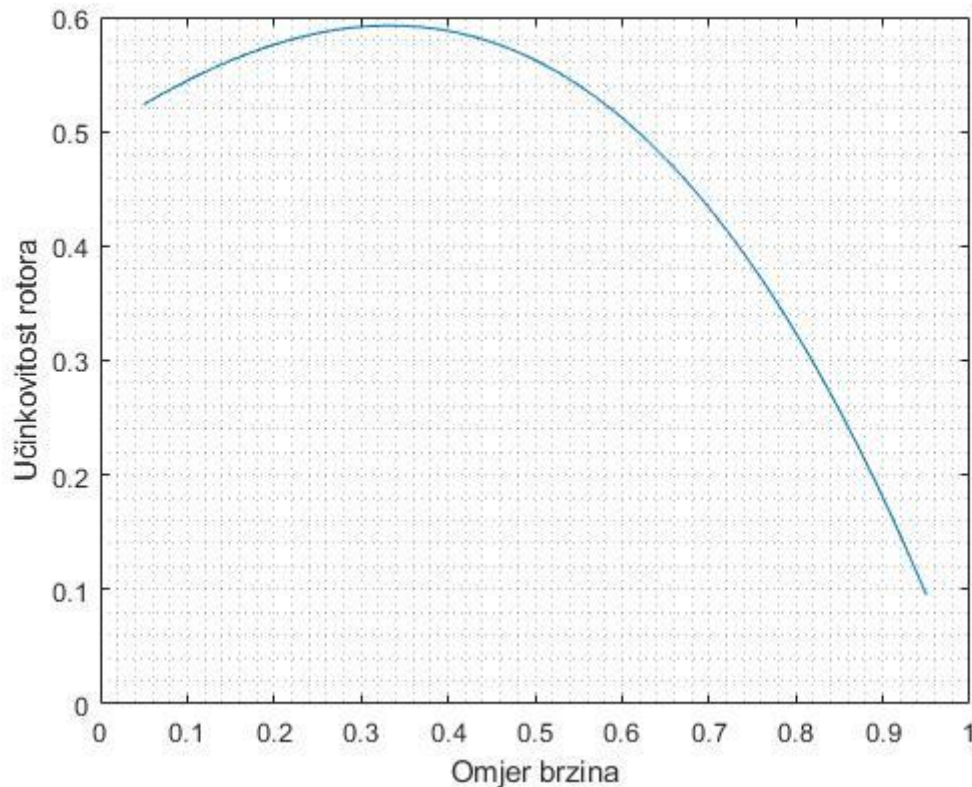
$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot C_p \quad (2-17)$$

C_p pokazuje koliki udio ulazne snage vjetra zahvaćeno elisama rotora. Preostala snaga se ispušta ili troši kod izlaznog vjetra iz elisa rotora. Taj faktor C_p se naziva koeficijentom snage rotora ili učinkovitost rotora. Taj koeficijent varira, to jest ovisi o omjeru ulazne i izlazne brzine

vjetra. Maksimalan teorijska učinkovitost rotora, odnosno teorijski koeficijent snage rotora je $16/27$, točnije $0,59259$. Taj koeficijent se naziva se naziva Betzov limit. Pa tako dobivamo:

$$P_{max} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot 0,59259 \quad (2-18)$$

Međutim u praksi učinkovitost rotora je ispod $0,5$ za visokobrzinske turbine, a kod turbina za niže brzine je on između $0,2$ i $0,4$. Ovisnost učinkovitosti o omjeru v_0/v prikazan je na slici 5.



Slika 5. Ovisnost koeficijenta snage rotora o omjeru brzina [5]

2.3. Vjetar u Hrvatskoj i svijetu

Vjetroelektrana je postrojenje u kojemu su vjetroagregati postavljeni jedan uz drugi, najčešće iste vrste, izložene istom vjetru i priključene na zajednički elektroenergetski sustav. Predstavljaju obnovljiv izvor energije, te ne ispuštaju otrovne plinove kao konvencionalni izvori energije, te ne troše nikakvo gorivo. Pri odabiru lokacije vjetroelektrane, osim energetskog potencijala vjetra, koji će kasnije biti obrađen, jako je bitno voditi računa i o energetsko-ekonomskim (vjetroelektrana mora imati pristupačno priključenje na mrežu, mora biti isplativa itd.), tehničko-tehnološkim (vjetroelektrana mora imati ispravne i pouzdane

dijelove) te prostorno-planskim (vjetroelektrana mora biti udaljena od stambenih četvrti i od zaštićenih područja) čimbenika.

Najpovoljnije lokacije za vjetroelektrane su obalna područja i otoci. Godišnja srednja brzina na takvim lokacijama je između 4 m/s i 7 m/s, što predstavlja jako povoljnu srednju brzinu. Najbrži vjetrovi su u zimskim periodima, pogotovo u siječnju i veljači, dok su najsporiji u ljetnim mjesecima, pogotovo u srpnju. Također učestali su bure i juga, koji znatno mogu povećati srednju brzinu, no oni mogu biti i opasni zbog svoje sile pa se biraju mjesta na kojima ti vjetrovi ne dosežu orkansku snagu.

Analiziranjem brzine vjetra u Republici Hrvatskoj otkriveno je da postoji 29 makrolokacija za instaliranje vjetroelektrana. Prvi vjetroagregat u Hrvatskoj koji se koristio u komercijalne svrhe postavljen je 1988. godine u brodogradilištu Uljanik, dok je prva vjetroelektrana Ravne I instalirana na otoku Pagu 2004. godine. Od tada ulaganje u energiju vjetra ne prestaje pa tako danas u Hrvatskoj postoji 20 vjetroelektrana s ukupno 254 vjetroagregata, čija je ukupna instalirana snaga 569,55 MW. Godišnja proizvodnja iznosi 1474 GWh, koje je dovoljno kako bi se pokrilo nešto više od 8% godišnje potrošnje električne energije u Republici Hrvatskoj. Neke od najvećih vjetroelektrana su Vratuša, Ponikve, Zelengrad, Lukovac itd. No u planu su još neke vjetroelektrane, a najznačajnija je VE Mravinjac kraj grada Dubrovnika s 29 vjetroagregata i instaliranom snagom od 87 MW i VE Krš-Pađene kraj Knina koja će imati 48 vjetroagregata i instaliranu snagu od 142 MW, čime će biti dvije najveće vjetroelektrane u Hrvatskoj. [6]

Ukupna instalirana snaga vjetroagregata u svijetu iznosi 600 GW. Vodeća država je Kina s 200 GW instalirane snage, gdje se također nalazi 5 najvećih vjetroelektrana na svijetu. Daleko najveća vjetroelektrana je Gansu vjetroelektrana s 6,8 MW instalirane snage i preko 3500 vjetroturbina. U svjetskom poretku nakon Kine ide SAD s nešto više od 100 GW, dok su u Europi vodeće države Njemačka i Španjolska. [1] [7]

3. MJERENJE I OPISIVANJE BRZINE VJETRA

Vjetar je oduvijek bio od velikog značaja u ljudskoj pobijesti. Egipćani su prije 5000 godina koristili vjetar za plovidbu rijekom Nil. Europljani su u 18. i 19. stoljeću vjetar koristili za mlinove, odnosno za mljevenje žitarica, ali i za pumpanje vode. Kasnije su ga koristili za proizvodnju električne energije. Budući da se sve više i više električne energije proizvodi pomoću vjetroelektrana, neophodno je znati brzinu vjetra. Brzina vjetra se može izraziti pomoću više jedinica za brzinu, a neke od njih su: metri po sekundi, kilometri po satu, čvorovi. Također će se u ovom poglavlju pisati o načinima opisivanja brzine vjetra beaufortovom tablicom i opisivanje matematičkim, odnosno statističkim metodama.

3.1. Instrumenti za mjerenje brzine vjetra

Instrumenti za mjerenje brzine se kroz povijest nisu mnogo mijenjali pa je tako jedan od najzastupljenijih instrumenata, anemometar, kroz povijest ostao gotovo i nepromijenjen. Tek sredinom prošloga stoljeća su se počeli razvijati moderniji anemometri. Anemometri se dijele u više skupina prema tome kakvu brzinu vjetra mjere (srednju ili trenutnu), prema uporabi (ručni ili fiksni) i prema izvedbi (mehaničke ili tradicionalne i nemehaničke ili moderne).

Kao što je već napisano, princip rada tradicionalnih mehaničkih anemometra se nije previše mijenjao. Prvi mehanički anemometar je napravio Leon Battista Alberti još 1450. godine. Ovakvi anemometri se sastoje od pokretnog, mehaničkog dijela, koji se pokreće uz pomoć vjetra. Oni sadrže senzore i pokazivače brzine.

3.1.1. Anemometri s lopaticama

Ova vrsta anemometara je najjeftinija u odnosu na ostale anemometre pa su samim time i najzastupljeniji. Oni sadrže senzore u obliku čašica, odnosno lopatica (šuplje polikugle). Te čašice su simetrično postavljene i pričvršćene na okomitu osovinu oko koje se vrte. One u svakom trenutku pružaju otpor vjetru, odnosno strujanju zraka, pa se tom vrtnjom inducira električni napon koji je proporcionalan brzini vjetra. Neka od svojstava ovih anemometara jesu vrlo dobra točnost ($\pm 4\%$) te širok mjerni opseg (1-75 m/s). Budući da imaju pokretne dijelove, postoji velika mogućnost kvara tih istih dijelova pri većim brzinama.



Slika 6. Anemometar
s lopaticama [8]

3.1.2. Propelerni anemometri

Ovakvi anemometri imaju krilca postavljena u obliku propelera, koji na razliku od prethodno opisanog anemometra postavljena okomito u odnosu na smjer vjetra, a osovina koja drži ta krilca je postavljena paralelno. Budući da vjetar mijenja svoj smjer, anemometar ovakve vrste se mora prilagođavati tom smjeru. Princip određivanja brzine vjetra kod ovakvih anemometara je isti kao i kod anemometara s lopaticama. Propelerni anemometri imaju također dobru točnost, no manji mjerni opseg (0,3-30 m/s), ali omogućuju osim mjerenja brzine vjetra i mjerenje volumnog toka i temperature, te određivanje ruže vjetrova. No nedostatak ovakvih anemometara je također mogućnost loma krilaca pri višim brzinama ili zbog pojave turbulencija, ali najveći nedostatak je taj što pri mjerenju brzine vjetra moraju biti usmjereni prema smjeru vjetra. Takvo usmjeravanje može biti ručno ili je potrebno ugraditi mehanizam koji će zakretati taj anemometar, no to povećava cijenu istog.



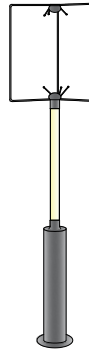
Slika 7. Propelerni anemometar [8]

Druga vrsta anemometara prema izvedbi su moderni anemometri. Moderni anemometri na razliku od tradicionalnih, mehaničkih anemometara nemaju pokretne dijelove, nego se njihov rad zasniva na mjerenju brzine laserskih zraka, brzine zvukova ili na mjerenju topline. Kao što je

već napisano, počeli su se razvijati tek u prošlogome stoljeću i pokazali su se kao jako dobri i pouzdani instrumenti za mjerenje brzine vjetra.

3.1.3. Ultrazvučni anemometri

Ovi anemometri koriste ultrazvučne valove pomoću kojih mjere brzinu i smjer vjetra. Oni su razvijeni sredinom prošloga stoljeća, a rade na način da mjere vrijeme leta zvučnog impulsa između zvučnog odašiljača i zvučnog prijemnika. Brzina zvuka će se smanjiti ili povećati ovisno o brzini vjetra koji puše. Uz pomoć tog smanjenja ili povećanja brzine zvuka određuje se brzina vjetra. Ovakvi anemometri su pogodni za mjerenje turbulencija. Budući da nemaju pomične dijelove, životni vijek im je vrlo dug. Najčešće se upotrebljavaju na udaljenim stanicama. Međutim, anemometri ove vrste su jako skupi, a najveći nedostatak je mogućnost gubitka signala koji se najčešće događa za vrijeme jake kiše ili nevremena.



Slika 8. Ultrazvučni anemometar [8]

3.1.4. Laser doppler anemometri

Ova vrsta anemometra kao i ultrazvučni anemometar predstavlja modernu vrstu anemometra. Laser Doppler anemometar su znanstvenici razvili 60-ih godina prošloga stoljeća kako bi izmjerili brzinu vjetra u olujama. On radi na principu dopplerovog efekta, odnosno on šalje mikrovalove prema ciljnom području te mjeri kako su se valovi promijenili dok su se vraćali prema emiteru. Ovakva vrsta anemometara pruža najtočnije rezultate i najveći mjerni opseg brzine vjetra. Još neke prednosti su te što nakon postavljanja istog nije potrebna nikakva daljna kalibracija, te ono omogućava trodimenzionalno mjerenje brzine i još omogućuje određivanje ruže vjetrova. No kao i kod ultrazvučnih anemometara, nedostatak im je skupoća.

3.1.5. Anemometri s ugrijanom žicom

Anemometri s ugrijanom žicom mjere brzinu vjetra tako što opažaju gubitak topline ugrijane žice koji je rezultat strujanja zraka. Ovi anemometri se sastoje od ugrijane žice čiji se otpor mijenja u ovisnosti o gubitku topline, te od dva držača čija je zadaća dovođenje električne energije. Žice kroz koje protiče električna struja su najčešće izrađene od platine, zbog svoje otpornosti na oksidaciju. Anemometri s ugrijanom žicom su pogodni za mjerenje turbulentnih vjetrova zbog velike brzine odziva, no najveći nedostatak im je njihova krhlost. Da bi se žica zagrijala na određenu temperaturu, koriste se dvije metode, odnosno dva načina rada:

- rad s konstantnom strujom
- rad s konstantnom temperaturom

Kao što sam naziv govori, kod prve metode anemometri rade tako što se temperatura žice prilagođava kako bi struja koja prolazi kroz nju bila stalna. A kod druge metode, temperatura ostaje stalna, dok se struja mijenja.

3.2. Beaufortova ljestvica

Beaufortova ljestvica ili skala povezuje brzinu vjetra s uočenim uvjetima na kopnu ili na moru. Ona se ne temelji na točnom mjerenju, nego se temelji na promatranju. Beaufortovu ljestvicu je osmislio Francis Beaufort 1805. godine, a za međunarodnu upotrebu je prihvaćena tek 1874. godine. Ova ljestvica se danas jako rijetko upotrebljava. Skala se sastoji od 13 razina (od 0 do 12), odnosno bofora, pri čemu svaka razina ima svoj opis vjetra, te određenu brzinu vjetra, maksimalnu visinu vala i glavne učinke vjetra na moru i na kopnu, dok neke razine imaju i vlastitu signalnu zastavu. Brzina vjetra po Beaufortovoj tablici zadana je izrazom:

$$v = Bf^{\frac{3}{2}} \cdot 0,836 \quad (3-1)$$

pomoću koje se može izraziti sljedeće:

$$Bf = \left(\frac{v}{0,836} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (3-2)$$

gdje je:

- Bf - razina u beaufortovoj tablici ili bofor

Opis vjetrova i prikaz njihovih razina, brzina, te učinaka prikazan je u tablici 1.

Tablica 1. Beaufortova skala [9]

Bofor	Opis vjetra	Brzina vjetra [m/s]	Visina vala [m]	Učinci na moru	Učinci na kopnu
0	Tišina	< 0.3	0	Površina mora kao ogledalo	Dim se diže okomito u vis
1	Lahor	0.3 - 1.5	0 - 0.2	Mreškanje mora	Smjer vjetra zapaža se po dimu
2	Povjetarac	1.6 - 3.3	0.2 - 0.5	Mali valići	Vjetar se osjeća na licu
3	Slab vjetar	3.4 - 5.5	0.5 - 1	Veći valići	Lišće i grančice se njišu
4	Umjeren vjetar	5.6 - 7.9	1 - 2	Mali valovi	Vjetar podiže prašinu
5	Umjereno jak vjetar	8 - 10.7	2 - 3	Umjereni valovi	Tanja stabla se njišu
6	Jak vjetar	10.8 - 13.8	3 - 4	Veliki valovi	Velike grane se njišu
7	Žestok vjetar	13.9 - 17.1	4 - 5.5	Vjetar otpuhuje pjenu s vala	Cijela stabla se njišu
8	Olujni vjetar	17.2 - 20.7	5.5 - 7.5	Umjereno visoki valovi velike dužine	Grane se počinju lomiti
9	Jak olujni vjetar	20.8 - 24.4	7.5 - 10	Visoki valovi	Laka oštećenja na zgradama
10	Orkanski vjetar	24.5 - 28.4	10 - 12.5	Vrlo visoki valovi	Velike štete na zgradama
11	Jak orkanski vjetar	28.5 - 32.6	12.5 - 16	Izuzetno visoki valovi	Velika razaranja
12	Orkan	≥ 32.7	≥ 16	Zrak ispunjen s kapljicama vode	Katastrofalna razaranja

3.3. Matematičke razdiobe za opisivanje brzine vjetra

Budući da snaga vjetra ovisi o trećoj potenciji brzine, tu veličinu je potrebno što bolje proučiti, jer o njoj najviše ovisi energetska potencijal neke lokacije, na primjer promjena brzine od 1% rezultira promjeni snage za 3%. Jedan od problema koje predstavlja vjetar je taj što je gotovo pa nepredvidljiv. On može biti različit svake minute, sata, dana, mjeseca i godine. Da bi se pouzdano procijenila srednja brzina vjetra, te njegove karakteristike, potrebno je promatrati vjetar najmanje deset godina, no takva dugoročna mjerenja ponekad nisu moguća najčešće zbog svoje skupoće. Također, neki projekti ne mogu toliko dugo čekati. Zbog toga postoje kraće metode procijene srednje brzine vjetra i karakteristika vjetra. Takva mjerenja u gotovo svim situacijama traju godinu dana. Budući da vjetar ovisi o Suncu, on se mijenja sezonski, što znači da bi brzina vjetra trebala biti prilično slična iz godine u godinu. Dvije najznačajnije metode za ovakav opis vjetra su:

- Weibullova razdioba
- Rayleighova razdioba

Kako se ove metode temelje na funkciji gustoće razdiobe vjerovatnosti njih još nazivamo i statističkim metodama.

3.3.1. Weibullova razdioba

Weibullova razdioba je najdetaljnija i najtočnija statistička razdioba. Kod nje su podaci brzine vjetra zadani tijekom kraćih vremenskih intervala (nekoliko minuta ili sekundi). Ona se opisuje s dvije funkcije, funkcijom gustoće razdiobe vjerojatnosti i kumulativnom funkcijom.

Funkcija gustoće $f(v)$ sadrži dva parametra, stoga ona predstavlja dvoparametarsku funkciju. Dana je jednačinom:

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}, \quad v \geq 0 \quad (3-3)$$

Gdje je:

- k - faktor oblika
- c - faktor skale [m/s]

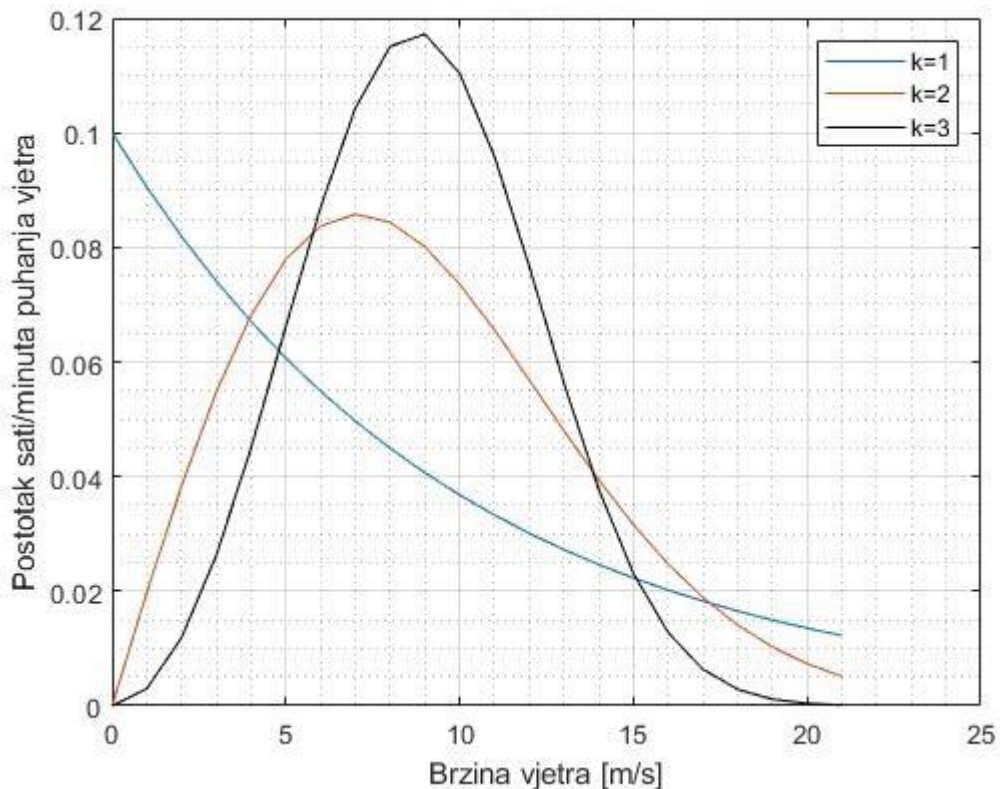
Karakteristična kumulativna funkcija slučajne varijable brzine $f(v)$ vjetra je kontinuirana funkcija, koja nam daje vjerojatnost da je brzina manja ili jednaka brzini v . Ona se određuje integriranjem funkcije $f(v)$, dakle vrijedi:

$$F(v) = \int_0^v h(v) \cdot dv \quad (3-4)$$

Ako formulu (3-2) uvrstimo u (3-3) dobije se:

$$F(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (3-5)$$

Kako bi weibullova razdioba bila što točnija potrebno je što bolje odrediti parametre c i k . Faktor oblika k nam određuje oblik razdiobe, to jest oblik krivulje pa se tako na slici 9 vidi da za $k=1$ dobijemo eksponencijalnu razdiobu koja se najčešće koristi za studije pouzdanosti. Za $k>3$, dobivena krivulja se približava krivulji za normalnu razdiobu, odnosno zvonoliku razdiobu. Srednja krivulja je krivulja čiji faktor oblika $k=2$. Razdioba koja se dobije za tu vrijednost faktora oblika je tipična razdioba vjerojatnosti brzine vjetra. Ona se naziva još i rayleighova razdioba., koja će biti pobliže objašnjena u sljedećem poglavlju. Dok nam k pokazuje oblik razdiobe, faktor skale c nam pokazuje koliko će krivulja biti široka. Što je c veći, to je razdioba šira.



Slika 9. Funkcija gustoće pri $c = 10$ [5]

Osim što nam parametri c i k pomažu da definiramo izgled razdiobe, oni nam također omogućuju da izračunamo i druge varijable koje nam pomažu da opišemo razdiobu. Te varijable

su standardna devijacija σ , srednja vrijednost brzine vjetra v_m , te kubna srednja vrijednost brzine vjetra v_m^3 . One su date formulama:

$$\sigma = c \cdot \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3-6)$$

$$v_m = \frac{\int_0^{\infty} v \cdot f(v) \cdot dv}{\int_0^{\infty} f(v) \cdot dv} = c \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (3-7)$$

$$v_m^3 = \frac{\int_0^{\infty} v^3 \cdot f(v) \cdot dv}{\int_0^{\infty} f(v) \cdot dv} = c^3 \cdot \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \quad (3-8)$$

gdje je $\Gamma(x)$ gama razdioba.

Kako faktor skale i faktor oblika jako utječu na razdiobu i njihova vrijednost treba biti što točnija tako su se razvile detaljne metode za njihovo računanje. Najčešće metode jesu:

1. Grafička metoda

Kod grafičke metode kumulativnu funkciju pretvaramo u linearnu funkciju primjenom logaritamskih pravila pa tako dobijamo:

$$\ln\{-\ln[1 - H(v)]\} = k \cdot \ln(v_i) - k \cdot \ln(c) \quad (3-9)$$

Ucertavanjem vrijednosti u koordinatni sustav dobijamo raspršene točke, koje čine krivulju, a ne pravac. Do pravca se dolazi primjenom linearne aproksimacije. Uz pomoć tog dobijenog pravca dobijaju se vrijednosti c i k . Parametar k je jednak nagibu tog pravca, a $k \cdot \ln(c)$ nam daje odsječak na ordinati, iz čega lagano možemo odrediti faktor skale.

2. Metoda standardne devijacije

Uz pomoć ove metode također možemo doći do faktora oblika i skale, ali na razliku od prošle metode, ova se metoda zasniva na matematičkom izračunu. Do c i k se dolazi preko omjera standardne devijacije i srednje brzine vjetra, pa vrijedi:

$$\left(\frac{\sigma}{v_m}\right)^2 = \frac{\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right)}{\Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right)} - 1 \quad (3-10)$$

Međutim, kako je gornji izraz veoma složen koriste se aproksimativne jednačbe koje glase:

$$k = \left(\frac{\sigma}{v_m} \right)^{-1,090} \quad (3-11)$$

$$c = \frac{v_m \cdot k^{2,6674}}{0.184 + 0.816 \cdot k^{2,73855}} \quad (3-12)$$

3. Metoda momenata

Moment za n-ti interval brzine vjetra zadan je izrazom:

$$M_n = c^n \cdot \Gamma\left(1 + \frac{n}{k}\right) \quad (3-13)$$

Neka su M_1 i M_2 momenti prvog i drugog intervala brzine vjetra, tada vrijedi:

$$c = \frac{M_2}{M_1} \cdot \frac{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)}{\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right)} \quad (3-14)$$

$$\frac{M_2}{M_1^2} = \frac{\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right)}{\Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (3-15)$$

4- Metoda najveće vjerovatnosti

Iznosi oba faktora su zadani formulama:

$$k = \left[\frac{\sum_{i=1}^n v_i^k \cdot \ln(v_i)}{\sum_{i=1}^n v_i^k} - \frac{\sum_{i=1}^n \ln(v_i)}{n} \right]^{-1} \quad (3-16)$$

$$c = \left[\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n v_i^k \right]^{\frac{1}{k}} \quad (3-17)$$

Weibullova razdioba pruža monogo mogućnosti i pogodnosti pa se tako pomoću nje može izračunati vjerojatnost da će brzina vjetra biti iznad neke vrijednosti v_1 :

$$p(v \geq v_1) = \int_{v_1}^{\infty} h(v) \cdot dv = e^{-\left(\frac{v_1}{c}\right)^k} \quad (3-18)$$

Na ovakav način se može procjeniti da li je lokacija na kojem je mjerena brzina vjetra pogodna za postavljanje vjetroelektrane. Tako na primjer srednje brzine koje su manje od 3 m/s neprihvatljive, one iznad 8 m/s su zadovoljavajuće, dok prosječne brzine između 12 m/s i 17 m/s izvrsne za izgradnju vjetroelektrana.

Također ova metoda daje mogućnost određivanja intervala vjerojatnosti prosječne brzine vjetra, odnosno pomoću nje se može odrediti vjerovatnost da će se prosječna brzina vjetra nalaziti između dvije određene brzine v_1 i v_2 . Takva vjerovatnost se računa pomoću sljedeće formule:

$$p(v_1 < v < v_2) = \int_{v_1}^{v_2} h(v) \cdot dv = e^{-\left(\frac{v_1}{c}\right)^k} - e^{-\left(\frac{v_2}{c}\right)^k} \quad (3-19)$$

3.3.2. Rayleighova razdioba

Znamo da su kod dvoparametarske Weibullove razdiobe podaci brzine dani tijekom kraćih vremenskih intervala, no to nije slučaj kod Rayleighove razdiobe. Kod nje su podaci brzine dani tijekom dužih vremenskih intervala (minute, sati, dani, tjedni, mjeseci). Već je spomenuto da kod Rayleighove razdiobe faktor oblika iznosi 2 pa ona predstavlja specijalan slučaj Weibullove razdiobe. Također valja napomenuti da je ova razdioba jednoparametarska. Glavni uvjet da bi neka razdioba bila Rayleighova, odnosno da faktor oblika iznosi 2 je taj da razdioba mora krenuti od nule.

Funkcija gustoće ove metode je prikazana na slici 9. Ona je zadana formulom:

$$f(v) = \frac{2 \cdot v}{c^2} \cdot e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^2} \quad (3-20)$$

Gdje faktor skale ovisi o srednjoj brzini v_m , koji je za rayleighovu metodu zadan izrazom:

$$v_m = c \cdot \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\pi} \quad (3-21)$$

Iz prethodne formule vrijedi da je:

$$c = \frac{2 \cdot v_m}{\sqrt{\pi}} \quad (3-22)$$

Funkcija razdiobe se također dobije integriranjem funkcije gustoće:

$$F(v) = \int_0^v f(v) \cdot dv = 1 - e^{-\frac{\pi}{4} \left(\frac{v}{v_m}\right)^2} \quad (3-23)$$

Formule za standardnu devijaciju i kubnu srednju brzinu su iste kao i za weibullovu metodu, a konačni izrazi su zadani formulama:

$$\sigma = c \cdot \sqrt{1 - \frac{\pi}{4}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{1}{\pi} - \frac{1}{4}} \cdot v_m \quad (3-24)$$

$$\overline{v^3} = \frac{6}{\pi} \cdot v_m^3 \quad (3-25)$$

Kao i kod weibellove razdiobe i kod rayleighove se može izračunati vjerojatnosti da će brzina biti veća od određene vrijednosti v_1 , kao i vjerojatnost da će se određena brzina vjetra naći u intervalu od v_1 do v_2 . Formule za izračun tih vjerojatnosti su zadane formulom:

$$p(v > v_1) = \int_{v_1}^{\infty} h(v) \cdot dv = e^{-\frac{\pi}{4} \left(\frac{v_1}{v_m}\right)^2} \quad (3-26)$$

$$p(v_1 < v < v_2) = \int_{v_1}^{v_2} h(v) \cdot dv = e^{-\frac{\pi}{4} \left(\frac{v_1}{v_m}\right)^2} - e^{-\frac{\pi}{4} \left(\frac{v_2}{v_m}\right)^2} \quad (3-27)$$

4. ANALIZA MJERNIH PODATAKA

Za statističku analizu mjernih podataka uzeta su mjerenja koja su dobivena na pet lokacija, smješteni u priobalju i otocima, u intervalu od 01. lipnja 2007. godine do 02. listopada 2008. godine. Izmjerene brzine su prosječne desetominutne brzine na 10 m, 30 m, 44 m i 46 m. Za potrebe analize prvo se uz pomoć formule (4-4) određuje koeficijent smicanja tla za zadano područje. [10]

$$v = v_0 \cdot \left(\frac{H}{H_0}\right)^\alpha \quad (4-1)$$

$$\frac{v}{v_0} = \left(\frac{H}{H_0}\right)^\alpha \quad (4-2)$$

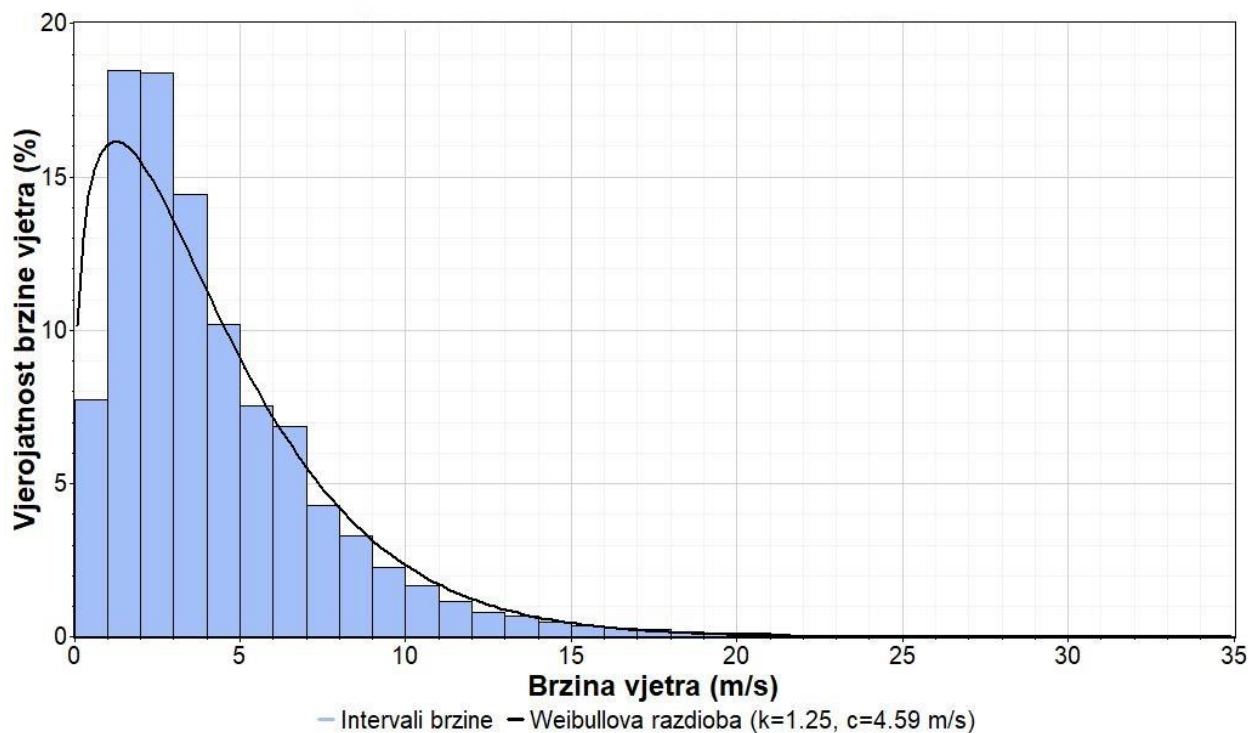
$$\ln\left(\frac{v}{v_0}\right) = \alpha \cdot \ln\left(\frac{H}{H_0}\right) \quad (4-3)$$

$$\alpha = \ln\left(\frac{\frac{v}{v_0}}{\frac{H}{H_0}}\right) = \ln\left(\frac{v \cdot H_0}{v_0 \cdot H}\right) \quad (4-4)$$

Budući da su vjetroturbine smještene na visini između 80 m i 100 m, potrebno je odrediti brzine vjetra na tim visinama. Za potrebe analize izabrana je visina od 80 m. Izmjerene vrijednosti dobivene pomoću formule (4-4) se ubacuju u formulu (2-2). Nakon toga dobivene vrijednosti je potrebno poredati u intervale od 1 m/s kako bismo mogli odrediti frekventnost neke brzine na promatranj lokaciji, pomoću koje se dobija Weibullova razdioba, te faktor skale i faktor oblika koji su potrebni za daljnu analizu.

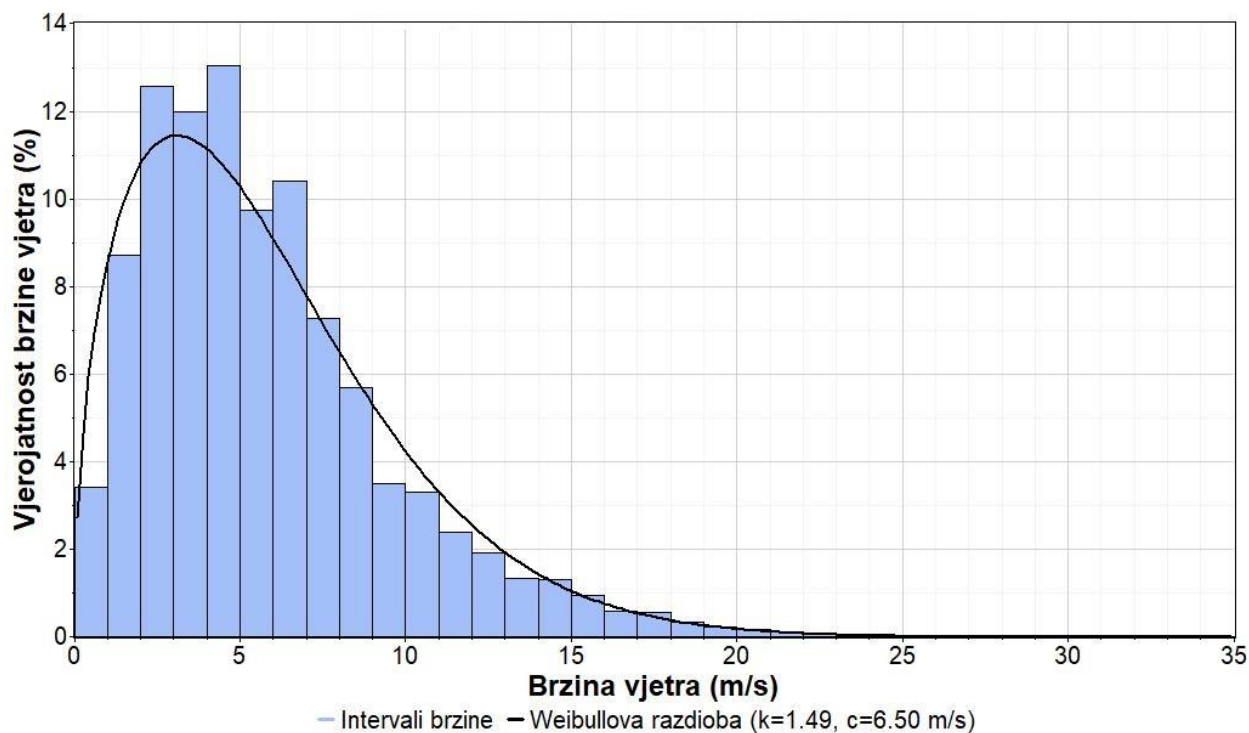
Prva analizirana lokacija je naselje Orah koje se nalazi kraj Vrgorca na granici s Bosnom i Hercegovinom. Iako se nalazi u neposrednoj blizini Jadranskog mora s kojeg pušu vjetrovi većih brzina, srednja brzina na ovoj lokaciji iznosi samo 4 m/s. Razlog tome je što ovo naselje ograđeno planinom Biokovo koji sprječava prodiranje vjetra s mora u to naselje. Na slici 10 se vidi da je faktor oblika jako malan, a iznosi 1,25. Budući da je taj faktor približan $k = 1$, on poprima oblik eksponencijalne razdiobe. Razlog što ova razdioba nema oblik čiste Rayleighove

razdiobe je taj što ona ne kreće od nule nego od 10 %, što znači da su na toj lokaciji vjetrovi između 0 m/s i 1 m/s jako učestali. Na slici se još može primjetiti da su najučestaliji vjetrovi između 1 m/s i 4 m/s, približno 20%, dok vjetrova iznad 15 m/s gotovo pa nema pa to rezultira jako malim faktorom skale.



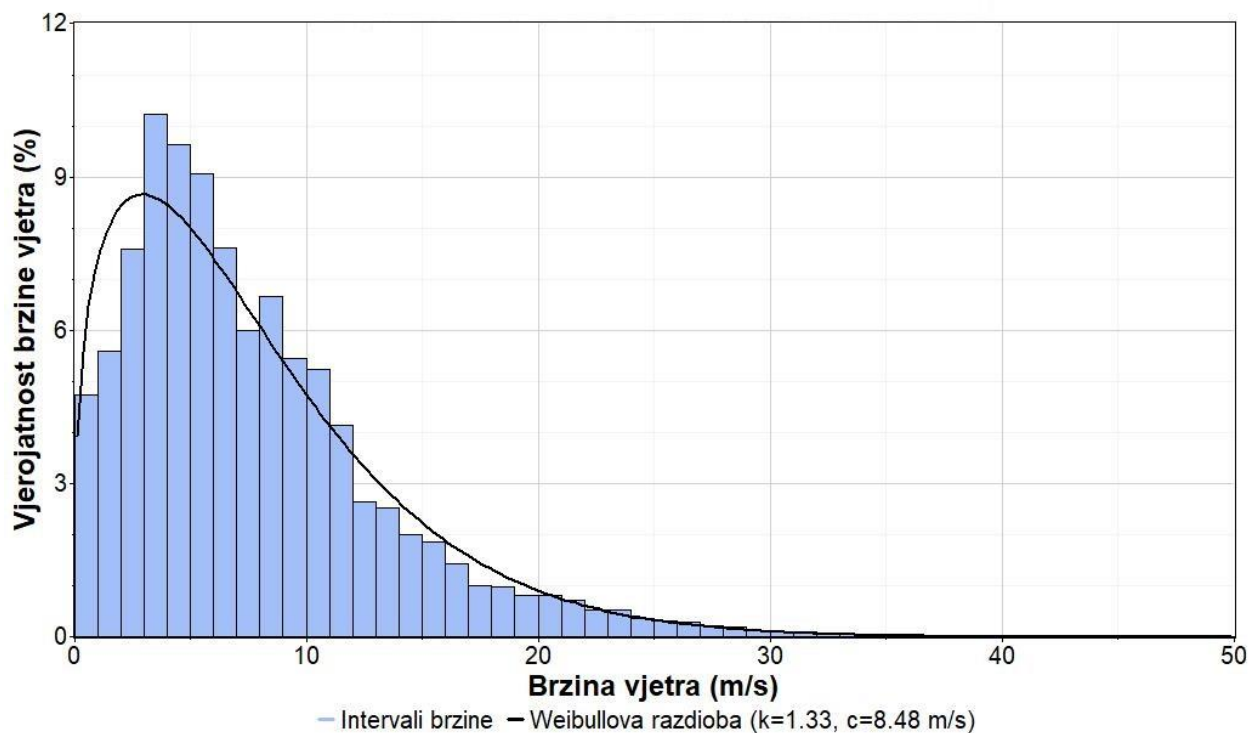
Slika 10. Dijagram brzine vjetra u Orahu

Sljedeća lokacija na kojoj se mjerila brzina vjetra je Zelovo koje se nalazi u blizini grada Sinja. Na sjeveru je omeđen planinom Dinarom, istočno planinom Kamešnicom, na zapadu se nalazi Svilaja, a na jugu prema Jadranu ga odvaja planina Mosor pa zbog toga nalazi u kotlini. Upravo je to razlog zbog čega je srednja brzina vjetra niska, a iznosi 5 m/s. Na slici 11 je prikazan dijagram brzine vjetra na ovoj lokaciji. Primjećuje se da najčešće pušu vjetrovi brzine između 1 m/s i 7 m/s. Također se vidi da ova razdioba poprima izgled Rayleighove razdiobe što rezultira većim faktorom oblika nego što je to bio slučaj u Orahu. Na ovoj lokaciji vjetrova iznad 17 m/s jako rijetko pušu, što znači da je razdioba šira nego u Orahu, to jest faktor skale je veći.



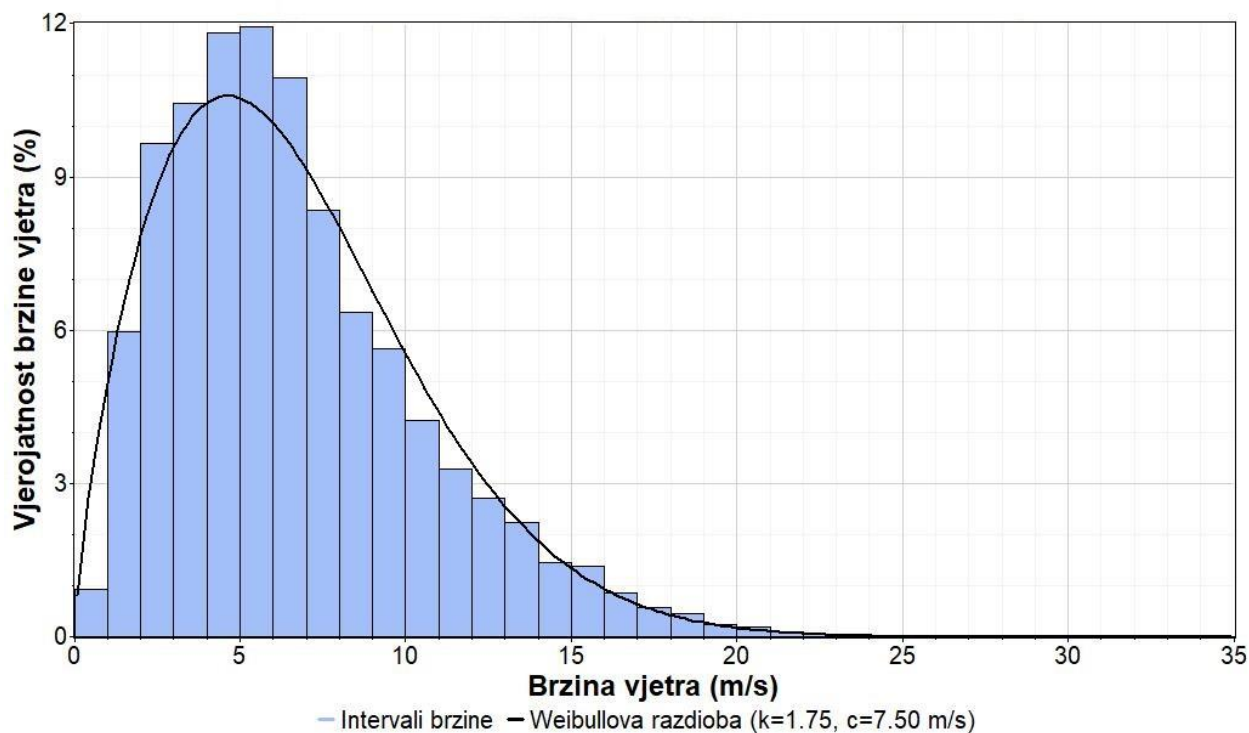
Slika 11. Dijagram brzine vjetra u Zelovu

Treća lokacija na kojoj su obavljena mjerenja brzine vjetra su Promine. Naselje Promine je smješteno između Knina i Šibenika podno istoimene planine Promine, koja se nalazi sjevero-istočno od naselja. Budući da nije ograđeno prema Jadranu može se očekivati veća srednja brzina nego u prethodne dvije lokacije. Ona iznosi nešto više od 8 m/s. Iz dijagrama se može primjetiti da su prisutne brzine od 0 m/s do 30 m/s, što znači da je faktor skale jako velik. Također se vidi da razdioba ne poprima oblik čiste Rayleighove razdiobe, a razlog tome je isti kao i u Orahu, odnosno česti su slabi vjetrovi između 0 m/s i 1 m/s, čija vjerojatnost između 4% i 5%.



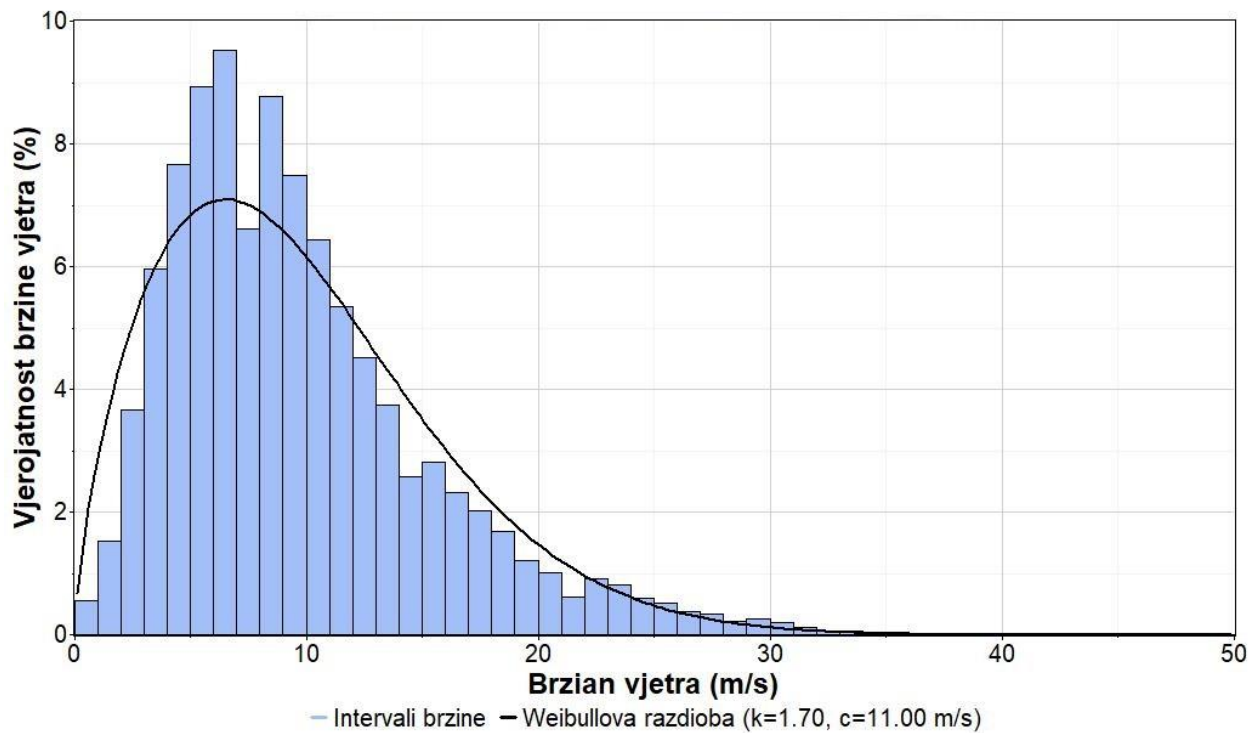
Slika 12. Dijagram brzine vjetra u Prominama

Sljedeća lokacija su Smokovljani koji se nalaze u blizini grada Dubrovnika. Ova lokacija je geografski gotovo ista kao i prethodna lokacija. Na sjeveru je ograđen s planinom Žaba u Bosni i Hercegovini, dok sa južne strane prema Jadranu nije ograđen brdima i planinama pa je srednja brzina oko 7 m/s. Na slici 13 se vidi kako razdioba gotovo u potpunosti poprima oblik Rayleighove, jer vjetrova oko 0 m/s gotovo pa nema. Vidi se kako su najčešći vjetrovi oko 5 m/s, a vjerojatnost te brzine vjetra iznosi 12%. Faktor skale je nešto manji nego u prethodnom slučaju jer su na ovoj lokaciji maksimalne brzine nešto niže, oko 20 m/s.



Slika 13. Dijagram brzine u Smokovljanima

Posljednja lokacija je otok Brač. Sa svih strana je okružen morem, odnosno nije omeđen planinama pa se na toj lokaciji može očekivati najbrži i najpovoljniji vjetar, bez velikih turbulencija. Srednja brzina na tom otoku iznosi 10 m/s. Na slici 14 se vidi kako vjetrova ispod 3 m/s gotovo pa i nema zbog čega razdioba gotovo pa poprima oblik čiste Rayleighove razdiobe. Također se vidi da su vjetrovi između 5 m/s i 10 m/s najučestaliji, a njihova vjerojatnost je između 8% i 10%. Maksimalne brzine su veće nego u bilo kojoj prethodnoj lokaciji, što znači da razdioba na ovoj lokaciji ima najveći faktor skale.



Slika 14. Dijagram brzine vjetra na otoku Braču

5. ENERGETSKI POTENCIJAL VJETRA

5.1. Vjetroagregati

Vjetroagregati su rotirajući strojevi koji služe kako bi se ostvario proces pretvorbe kinetičke energije vjetra u električnu energiju. Taj proces započinje samim dolaskom vjetra na lopatice rotora. Okretanjem tih lopatica dobivena mehanička energija se uz pomoć generatora pretvara u električnu energiju. Najčešće se koriste sinkroni i asinkroni generatori. Sinkroni se koriste kod mreža manjih snaga, dok asinkroni kod mreža većih. Rotor s lopaticama i kućištem u kojem se nalazi generator su postavljeni na stup vjetroagregata, koji služi kako bi se oni podigli na optimalnu visinu iznad tla.

Vjetroagregati, osim što se dijele prema broju lopatica, visini, vrsti generatora ili snazi, mogu biti podijeljeni i prema položaju osi rotora. Tako postoje:

- vjetroagregati s horizontalnom osi (engl. *HAWT – Horizontal Axis Wind Turbine*)
- vjetroagregati s vertikalnom osi (engl. *VAWT – Vertical Axis Wind Turbine*)

Kao što samo ime govori, kod horizontalne izvedbe, os vrtnje je paralelna sa smjerom vjetra i paralelna u odnosu na tlo. Većina vjetroagregata je ovoga tipa, te su najčešće u izvedbi s tri lopatice. Te lopatice mogu biti postavljene tako da one gledaju prema vjetru ili tako da one gledaju od vjetra. Kod prvih je potrebno ugraditi mehanizam za zakretanje, dok kod drugih to nije potrebno. Međutim kod vjetroagregata koje gledaju od vjetra se pojavljuju povećane turbulencije koje ih mogu ozbiljno oštetiti, zbog čega je takva izvedba rijetka. Prednost HAWT vjetroagregata je njihova učinkovitost, te mogućnost zakretanja kako bi se vjetar što više iskoristio. Također je pozitivno to što se mogu postaviti na velike visine čime se dobija pristup vjetrovima viših brzina i malih turbulencija. Nedostaci ovakvih vjetroagregata su ti što oni zahtjevaju sustav za njihovo zakretanje, što povećava cijenu samog instaliranja. Također zbog svoje veličine pojavljuju se i veliki troškovi transporta.

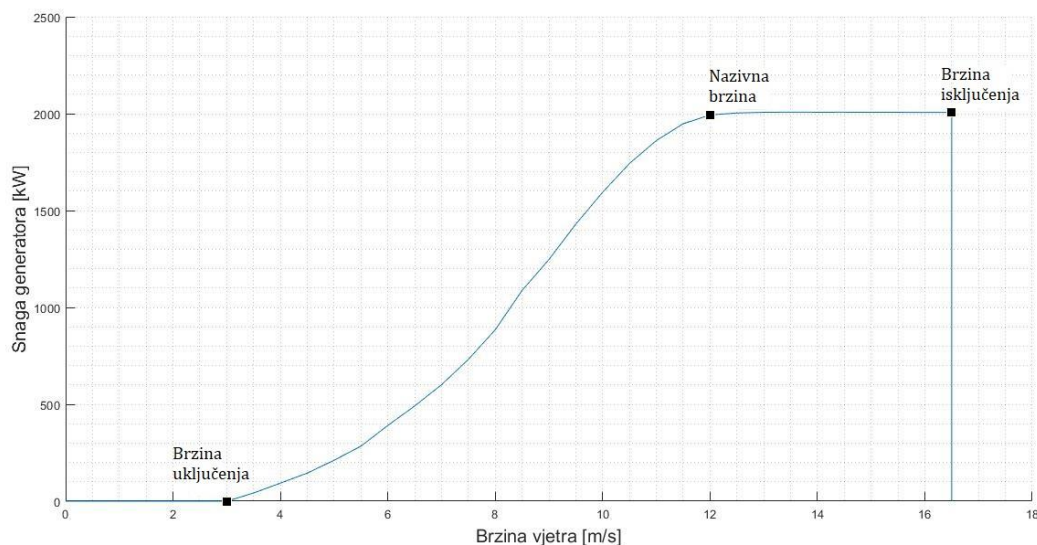
Kod izvedbi VAWT vjetroagregata, os vrtnje je vertikalna u odnosu na smjer vjetra. Upravo zbog te karakteristike za VAWT turbine nisu potrebni visoki tornjevi. Prednosti ovakvih vjetroagregata je ta što su pristupačniji zbog svoje male visine, te što su svi bitni dijelovi (generator, frekvencijski pretvarači itd.) postavljeni pri tlu. No brzina vjetra na visini na kojoj su postavljeni VAWT turbine su male, te zbog toga ovakvi vjetroagregati imaju smanjenu učinkovitost. Uz to, ti vjetrovi na manjim nadmorskim visinama imaju veće turbulencije, zbog

čega je potrebno turbine učvrstiti sa zateznim užadima kako bi im se povećala stabilnost. Oni mogu biti izvedeni na dva načina pa tako postoji Darrieusova turbina i Savoniusova turbina.

Znamo da snaga vjetra ne ovisi samo o kubu brzine nego i o učinkovitosti rotora. Učinkovitost rotora je već opisana u poglavlju 2.2., gdje vidimo da se ona kreće u rasponu 0,2 do 0,59259 (Betzov limit), te ona predstavlja važan čimbenik pri odabiru generatora. No kod odabira generatora također se mora voditi računa i o krivulji snage. Svaki generator posjeduje svoju vlastitu krivulju snage. Ta krivulja predstavlja graf koji nam govori koliko se električnog outputa može dobiti uz određenu brzinu vjetra. Na tom grafu se mogu odrediti tri osnovne točke, odnosno tri karakteristične brzine.

Pri malim brzinama nema dovoljno zakretnog momenta kako bi se lopatice okretale. Povećanjem brzine vjetra, lopatice turbine se počinju zakretati. Brzina pri kojoj se lopatice počinju okretati se naziva brzina uključenja (engl. *cut-in*). Ta brzina je najčešće u intervalu od 3 m/s do 4 m/s. Povećanjem brzine vjetra povećava se i količina električnog outputa, odnosno električne snage. Krivulja poprima oblik kubne funkcije, no pri brzini između 13 m/s i 17 m/s količina električne snage koju proizvodi generator doseže svoj maksimum. Ta brzina se naziva nazivna brzina, te ona predstavlja drugu karakterističnu brzinu krivulje snage. Daljnim povećanjem brzine, količina dobivene snage ostaje ista sve do treće karakteristične brzine, pri kojoj se uključuje sustav kočenja turbine koja vraćaju vjetroagregat u stanje mirovanja, kako bi se spriječila oštećenja turbina i generatora. Ta brzina se naziva brzinom isključenja (engl. *cut-out*) i ona je najčešće u intervalu između 22 m/s i 25 m/s.

Pomoću krivulje snage se može odrediti i energetski potencijal vjetra na nekome području, odnosno može se ustanoviti da li je neko područje pogodno za instaliranje vjetroelektrane. Taj energetski potencijal će se odrediti uz pomoć već određenih dijagrama brzine vjetra, te Weibullovom razdiobom i krivulje snage generatora Vestas V90 nazivne snage 2 MW.



Slika 15. Krivulja snage vjetroagregata [11]

5.2. Određivanje energetskog potencijala

Glavni zadatak ovog rada je bio odrediti energetski potencijal na temelju mjerenja brzine vjeta. Određivanje tog potencijala je jako bitno kako bi se ustanovilo da li je neka lokacija pogodna za instaliranje novih vjetroagregata. Da bi neka lokacija imala zadovoljavajući energetski potencijal ona mora imati srednju brzinu veću od 4 m/s. Razlog tome je taj što brzina vjetroagregata ima brzinu uključenja blisku toj vrijednosti. To znači da lokacije na kojima su brzine od 0 m/s do 4 m/s najfrekventnije nemaju povoljan energetski potencijal. Sljedeći uvjet za povoljan potencijal jest taj da na lokacijama na kojima se planiraju instalirati vjetroagregati imaju što manje brzih vjetrova, odnosno vjetrova bržih od brzine isključenja. Daleko najpovoljnije lokacije su one gdje su najfrekventnije brzine vjetrova između nazivne brzine generatora i brzine isključenja, jer tada snaga generatora ima najveću vrijednost. Već je navedeno da se brzine isključenja kreću između 22 m/s i 25 m/s. Međutim brzina isključenja vjetroagregata koji će se obrađivati u ovoj analizi iznosi 16,5 m/s, a nazivna 12 m/s. Proizilazi zaključak da u ovoj analizi lokacije čiji su najfrekventniji vjetrovi između 12 m/s i 16,5 m/s imaju najpovoljniji energetski potencijal. Također je bitno da vjetar na ispitivanim lokacijama bude što učestaliji i ima što manje turbulencija. Određivanje potencijala se može odrediti pomoću dvije metode. Prva metoda je histogramna metoda, a kod druge metode određivanje potencijala se vrši pomoću funkcije gustoće.

5.2.1. Histogramska metoda

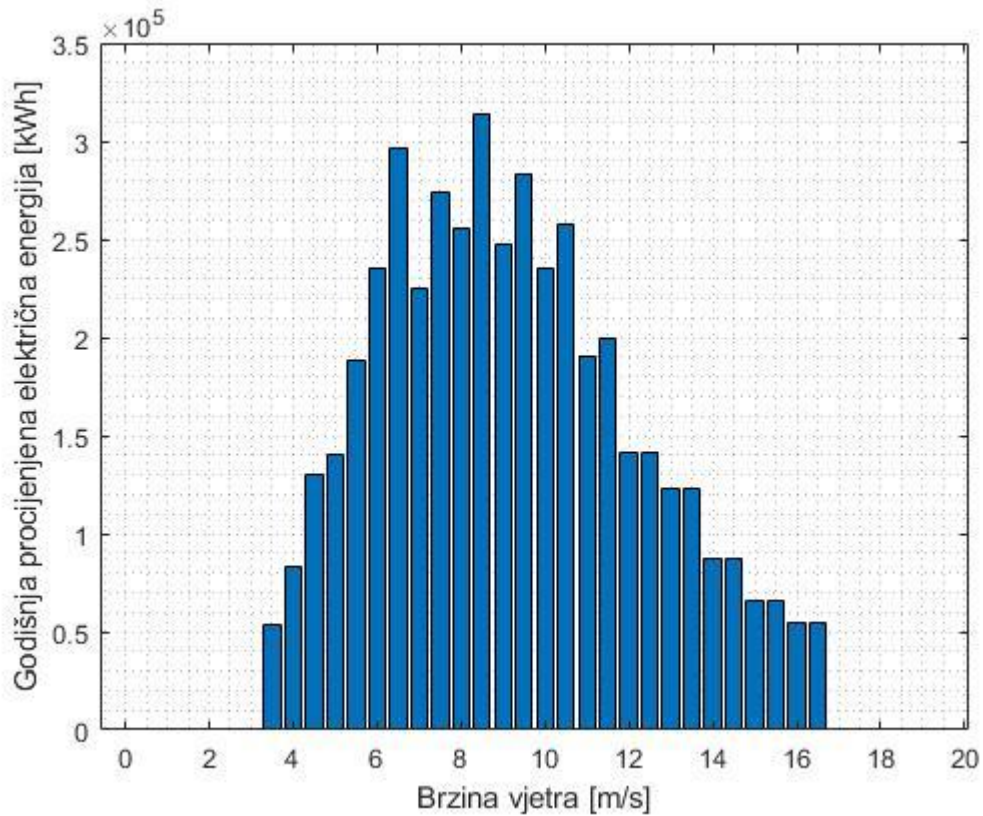
Kod histogramске metode određivanja potencijala vjetra do rezultata se dolazi korak po korak uporabom grafova. Uz pomoć dobivenih dijagrama brzine vjetra i krivuljom snage zadanog vjetroagregata Vestas V90 se određuje energetska potencijal. Postupak započinje određivanjem vjerojatnosti neke brzine vjetra koja se množi sa snagom koju vjetroagregat može ostvariti za istu brzinu, nakon čega se te vrijednosti zbrajaju. Ukupna dobivena vrijednost se množi s 8760 h kako bi se dobila godišnja procijenjena električna energija. Dobiveni rezultat se analizira, te se zaključuje da li taj rezultat dovoljan za pokrivanje potreba tržišta električne energije, odnosno da li je isplativ.

$$W_{uk1} = 8760 \cdot \sum_{i=1}^n p(i) \cdot P_g(i) \quad (5-1)$$

gdje je:

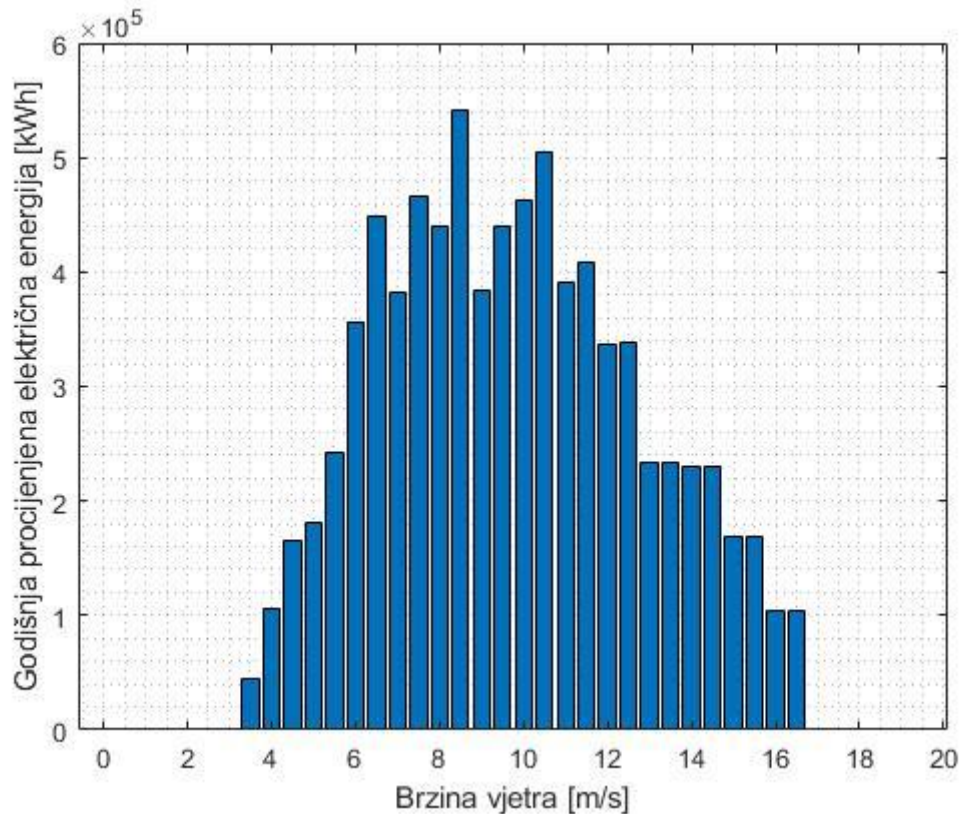
- W_{uk1} - ukupna godišnja procijenjena električna energija dobivena histogramskom metodom [kWh]
- n - krajnja brzina do koje se određuje potencijal
- $p(i)$ - vjerojatnost i -te brzine vjetra
- $P_g(i)$ - snaga vjetrogeneratora za i -tu brzinu [kW]

Kao što se na slici 10 vidjelo kako Orah predstavlja najlošiju lokaciju za instaliranje vjetroagregata tako se i na slici 19 može primjetiti isto. Najviše električne energije se ostvari pri puhanju vjetra brzine 9 m/s, a ona iznosi samo 0,3 GWh. Također se vidi da je električna energija jako mala u intervalu brzine od 12 m/s do 16,5 m/s gdje se ona spušta ispod 0,1 GWh. Ukupna godišnja procijenjena električna energija iznosi 4,6 GWh. Godišnja potrošnja električne energije u Hrvatskoj iznosi otprilike 18 TWh. To znači da na toj lokaciji potrebno instalirati otprilike 40 vjetroagregata Vestas V90 kako bi se pokrio samo 1% ukupne potražnje električne energije.



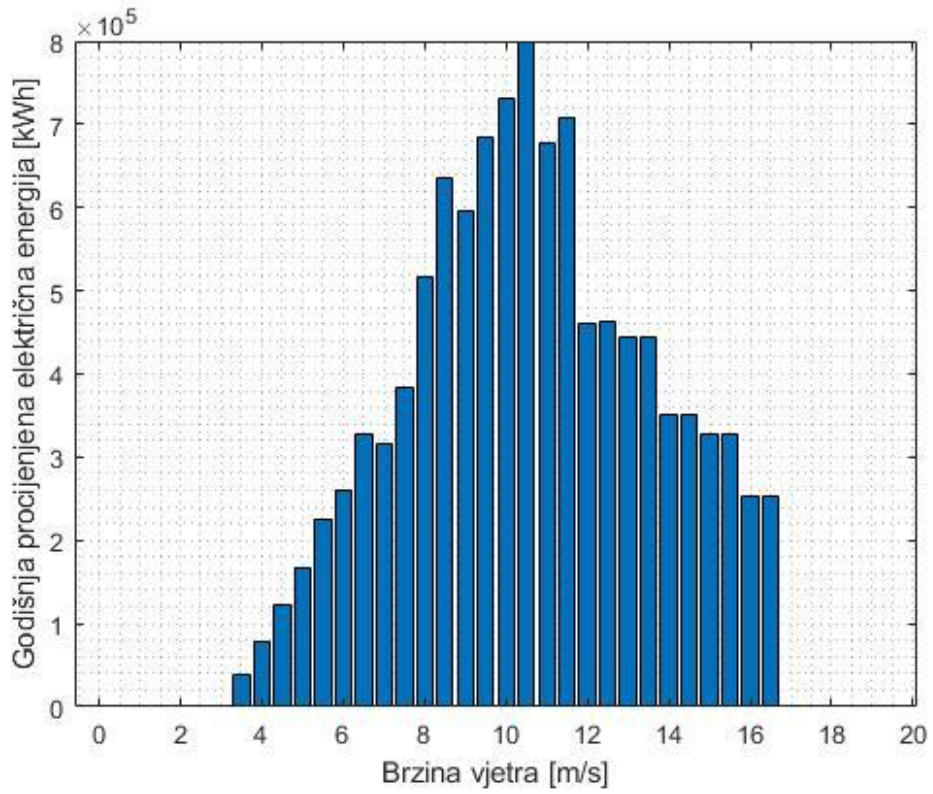
Slika 16. Dijagram potencijala vjetra u Orahu

Kao što je i opisano u prethodnom poglavlju, Zelovo je po svojim karakteristikama malo povoljnija od Oraha. Prosječna brzina vjetra je nešto veća, ali i vjetrovi brzine između 12 m/s i 16,5 m/s su frekventniji. Zbog toga se mogu očekivati i bolji rezultati procijenjene električne energije. Najviše proizvedene električne energije se može očekivati puhanjem vjetra brzine 8 m/s, a tada ona iznosi 0,55 GWh. Formulom (5-1) je ustanovljeno da je procijenjena godišnja električna energija iznosi 8,1 GWh što je gotovo dvostruko više nego u Orahu. Samim time potrebno je instalirati dvostruko manje istih vjetroagregata kako bi se pokrio 1% ukupne potrošnje električne energije u cijeloj Hrvatskoj.

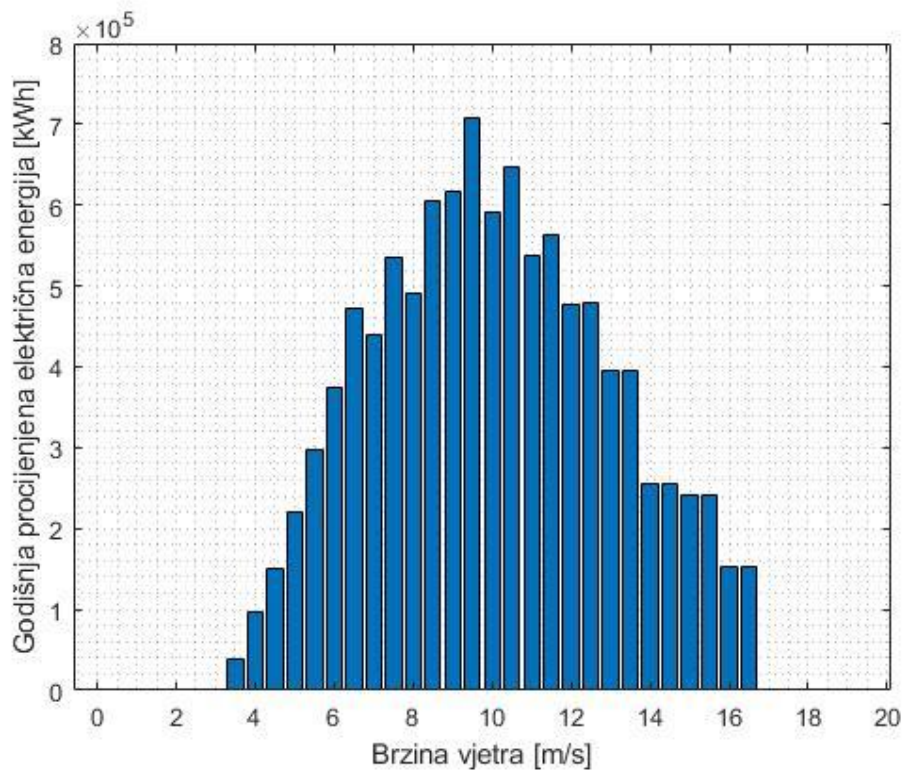


Slika 17. Dijagram potencijala vjetra u Zelovu

Sljedeće dvije lokacije su Promine i Smokovljani. Već je opisano u prethodnom poglavlju kako su ove dvije lokacije po svojem geografskom položaju i karakteristikama gotovo identične pa samim time se može očekivati i jednaka godišnja procjena proizvedene električne energije. U Prominama ona iznosi 10,95 GWh, dok u Smokovljanima 10,43 GWh. Kako bi se pokrio 1% potražnje električne energije u Hrvatskoj potrebno je instalirati 16 vjetroagregata Vestas V90. Na slici 21 se vidi kako se u Prominama pri višim brzinama dobije više električne energije nego u Smokovljanima pri istim tim brzinama. Razlog tome leži u širini dijagrama na slici 12, to jest frekventnost vjetrova brzina između 12 m/s i 16,5 m/s su jako velike. Po tome se vidi da faktor skale c igra jako veliku ulogu u procjeni energetskog potencijala.

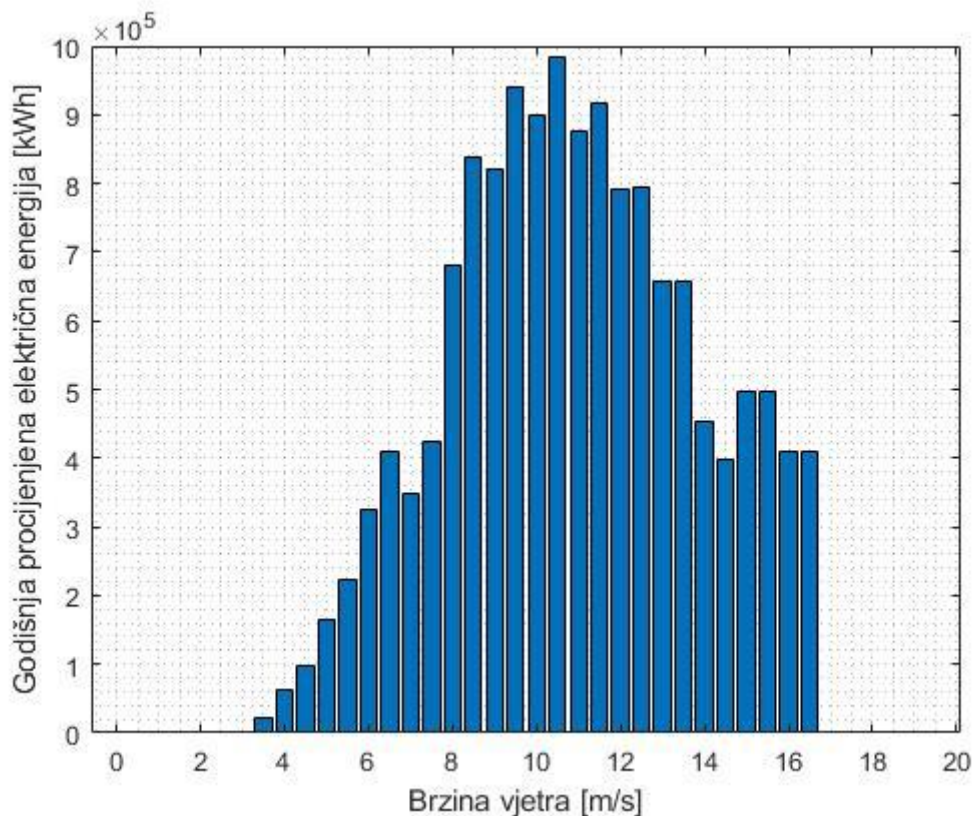


Slika 18. Dijagram potencijala vjetra u Prominama



Slika 19. Dijagram potencijala vjetra u Smokovljanima

Kao što je već opisano, otok Brač predstavlja najpovoljniju lokaciju za instaliranje vjetroagregata. Ukupna godišnja procijenjena proizvodnja električne energije iznosi 14,6 GWh pa proizilazi podatak da je potrebno samo 12 vjetroagregata kako bi se pokrio 1% godišnje potrošnje električne energije u Hrvatskoj. Na slici 23 se vidi kako pri brzinama od 9 m/s do 12 m/s može očekivati najveća proizvodnja električne energije u iznosu između 0,9 GWh i 1 GWh. Također se vidi kako su brzine vjetrova između nazivne brzine i brzine isključenja jako frekventne pa samim time se tada proizvodi više električne energije nego na ostalim lokacijama pri istim brzinama.



Slika 20. Dijagram potencijala vjetra na otoku Braču

5.2.2. Metoda uz pomoć funkcije gustoće

Kao što samo ime metode kaže, za izračun se koristi funkcija gustoće. Budući da funkcija gustoće predstavlja aproksimativnu krivulju vjerojatnosti brzine vjetra, ova metoda je manje točna nego prethodna pa se mogu očekivati nepodudaranja. Vrijednosti $f(v)$ se određuju pomoću formule (3-2), te se množe s vjerojatnošću brzine vjetra i 8760 h kako bi se dobila godišnja procijenjena proizvedena električna energija za neku brzinu. Na poslijetku se dobivene vrijednosti sumiraju kako bi se dobila ukupna procijenjena proizvodnja električne energije.

Najveća prednost ove metode što je brža i lakša, te ne uzrokuje pogreške prilikom očitavanja vrijednosti s grafova kao kod histogramске metode. Također dijagram poprima ljepši i pravilniji izgled, odnosno poprima izgled funkcije gustoće, te nema više nepravilnosti i nepredvidljivih vrijednosti.

$$W_{uk2} = 8760 \cdot \sum_{i=1}^n f(i) \cdot P_g(i) \quad (5-2)$$

gdje je:

- W_{uk2} - ukupna godišnja procijenjena električna energija dobivena metodom uz pomoć funkcije gustoće [kWh]
- $f(i)$ - vrijednost funkcije gustoće pri i -toj brzini

Budući da pri ovoj aproksimativnoj metodi javlja određena greška, tu grešku ćemo odrediti pomoću formule (5-4):

$$W_{sr} = \frac{W_{uk1} + W_{uk2}}{2} \quad (5-2)$$

$$\Delta W = W_{uk1} - W_{uk2} \quad (5-3)$$

$$\varepsilon_{aps} = \frac{\Delta W}{W_{sr}} \cdot 100 \quad (5-4)$$

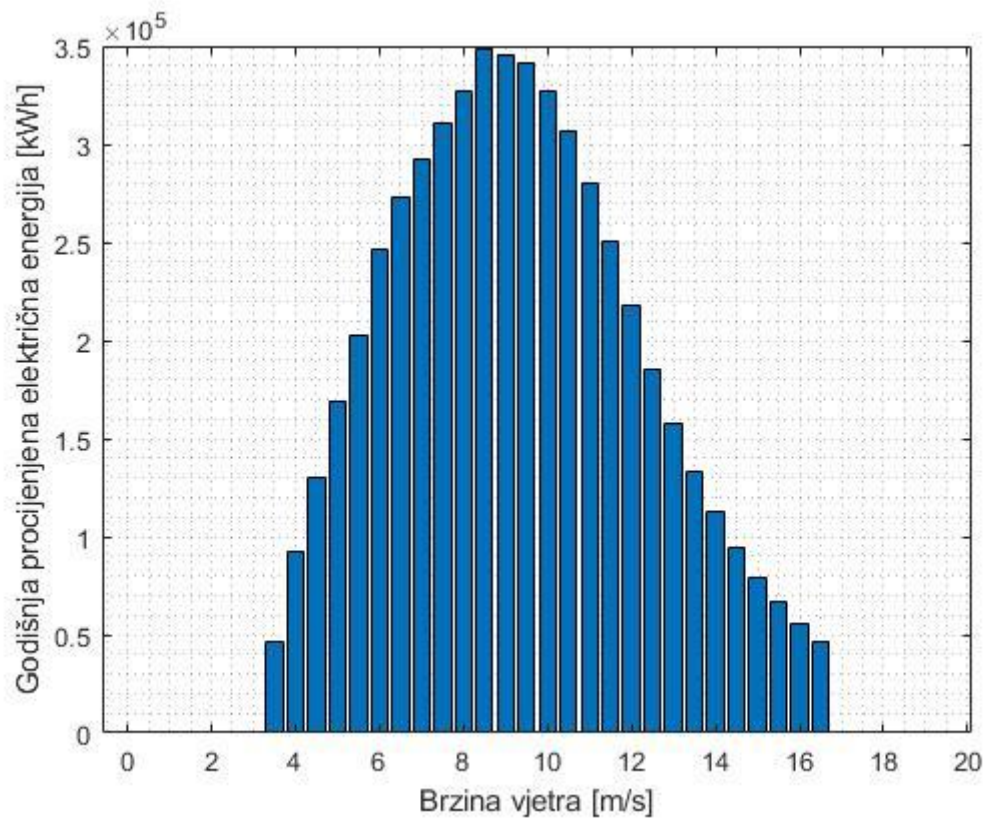
gdje su:

- W_{sr} - aritmetička sredina godišnje procijenjene proizvodnje električne energije [kWh]
- ΔW - razlika godišnje procijenjene proizvodnje električne energije [kWh]
- ε_{aps} - relativna postotna pogreška [%]

Ta nepodudaranja se javljaju zbog toga što se vrijednost Weibullove razdiobe dosta razlikuje od stvarne vrijednosti. U sljedećim primjerima će se vidjeti kako lokacije s većim faktorom skale imaju manju grešku, odnosno što je razdioba šira to ona bolje odgovara stvarnim vrijednostima.

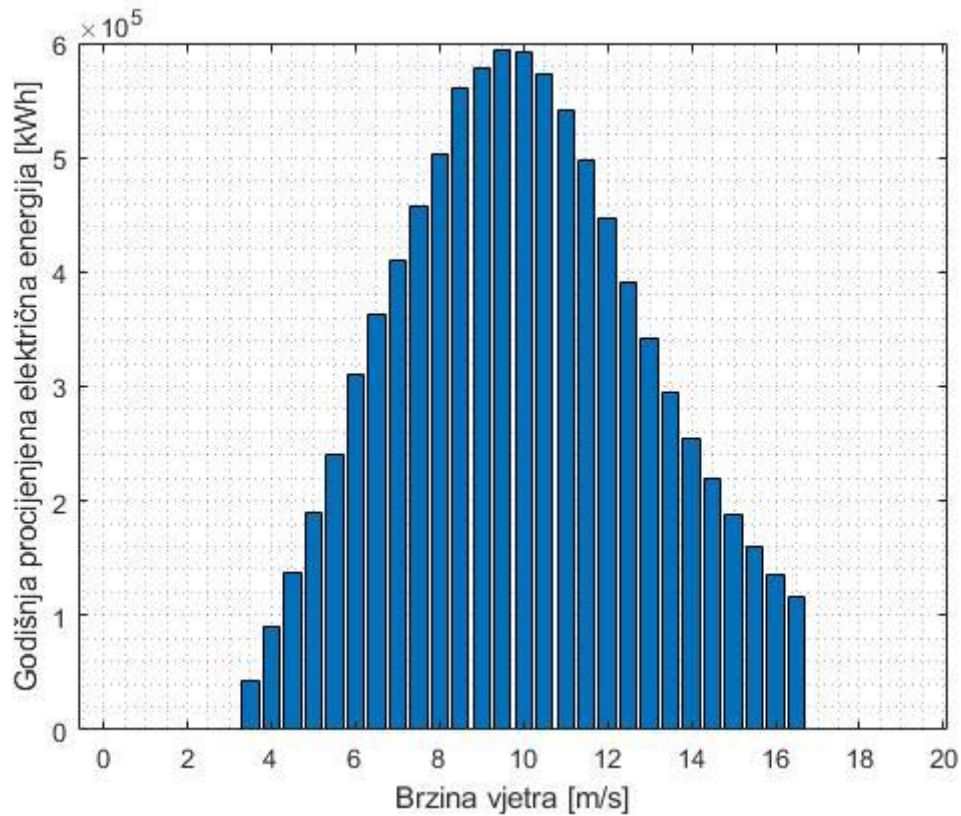
Procijenjena proizvodnja električne energije metodom s funkcijom gustoće u Orahu iznosi 5,4 GWh, što je nešto više nego vrijednost dobivena histogramskom metodom. Formulom (5-4) je dobivena postotna greška u iznosu od 17,75%. Razlog toliko velike pogreške je taj što

vrijednost krivulje Weibullove razdiobe pri određenim brzinama jako odudara od stvarnih vrijednosti. Ta razlika se na slici 10 najbolje vidi pri brzinama od 1 m/s do 3 m/s gdje iznosi 5%.



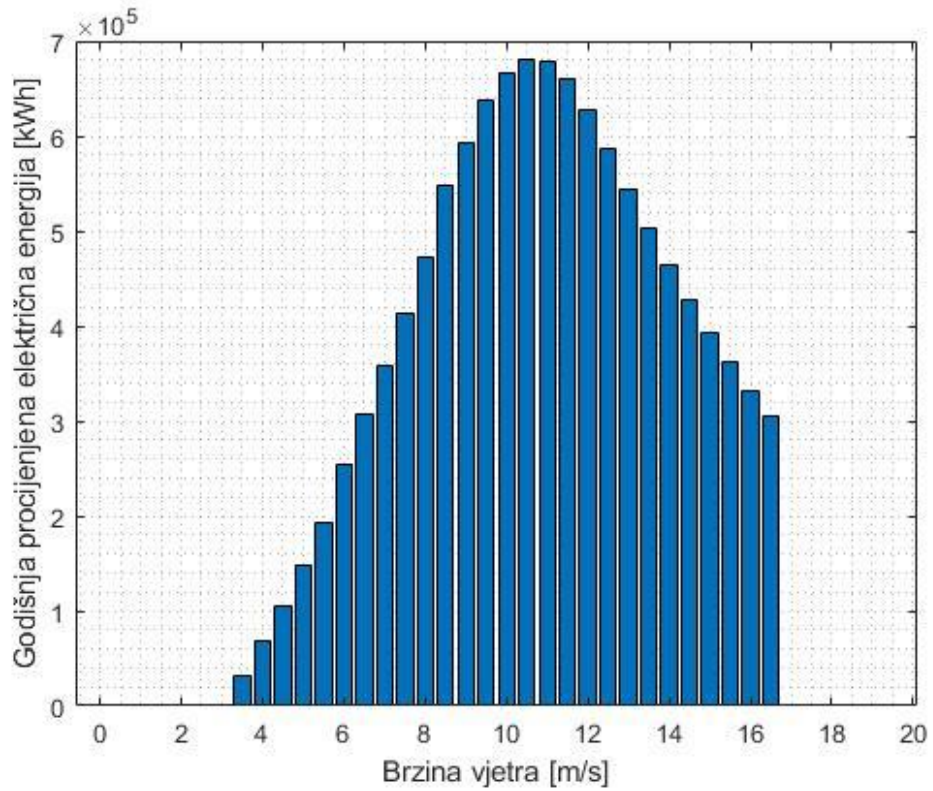
Slika 21. Dijagram potencijala vjetra u Orahu

Sljedeća lokacija je Zelovo. Ovom metodom je dobivena vrijednost proizvedene električne energije u iznosu od 9,2 GWh, pri čemu se dobije greška 12,89%. Vidimo da se i u Zelovu javlja velika greška, međutim nešto manja nego kao u Orahu, a razlog ostaje isti.

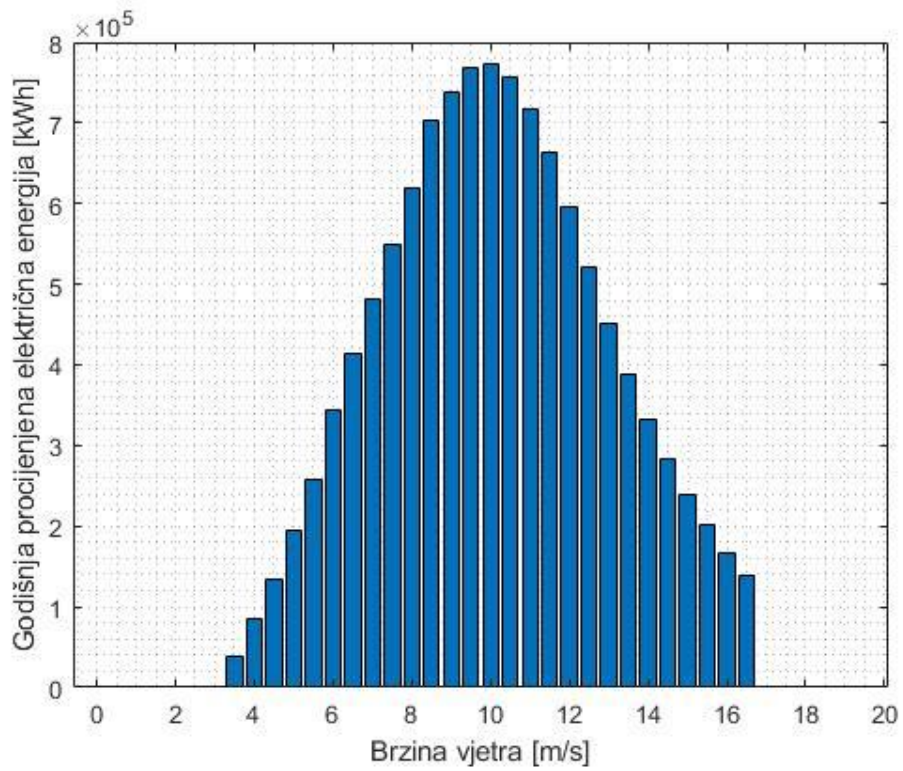


Slika 22. Dijagram potencijala vjetra u Zelovu

U Prominama je dobivena vrijednost proizvedene električne energije u iznosu od 11,35 GWh, a postotna pogreška u iznosu od 3,69%. Dok je u Smokovljanima vrijednost procijenjene proizvedene električne energije 11,55 GWh, a pogreška 10,26%.

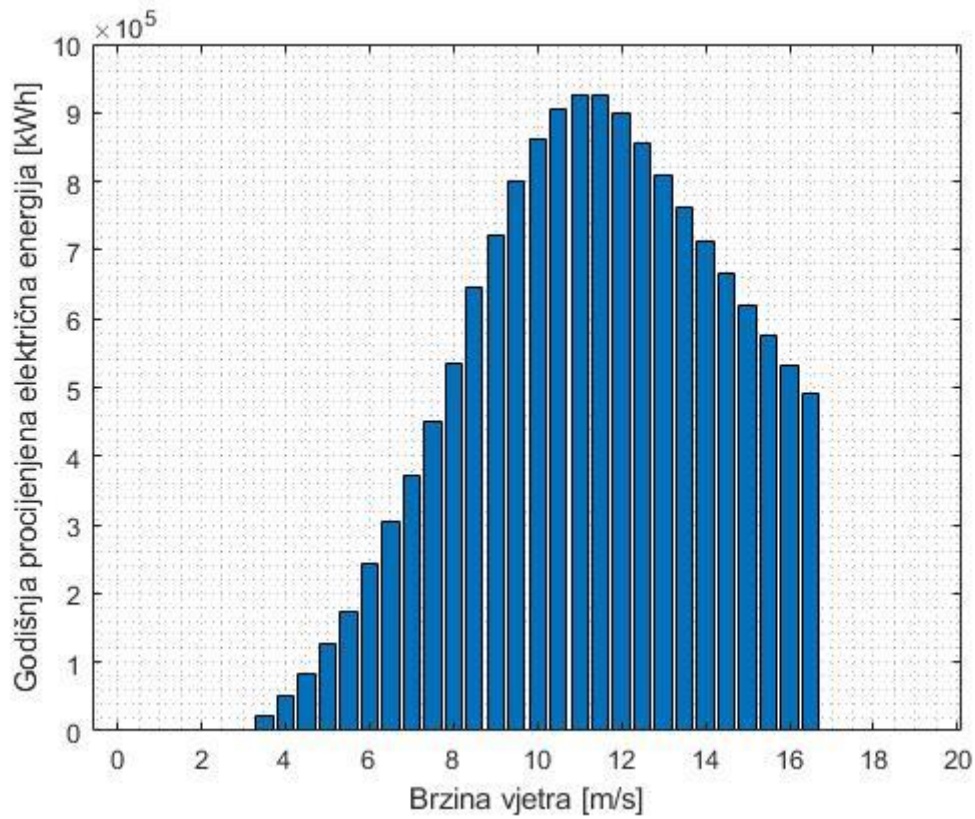


Slika 23. Dijagram potencijala vjetra u Prominama



Slika 24. Dijagram potencijala vjetra u Smokovljanima

Računanjem godišnje procijenjene električne energije na otoku Braču dobivena je vrijednost u iznosu od 15,08 GWh. U odnosu na procijenjenu električnu energije pomoću histogramске metode dobiva se greška od 3,26%.



Slika 25. Dijagram potencijala vjetra na otoku Braču

6. ZAKLJUČAK

Nakon teorijske podloge o vjetru i pretvorbi energije vjetra u električnu energiju, te izvršenih mjerenja na pet različitih lokacija i analize istih donešen je zaključak da najbolji energetski potencijal ima otok Brač, dok najlošije Orah i Zelovo. Razlog tako dobrog potencijala ne samo na otoku Braču, nego i na ostalim sličnim otocima (Pag, Rab itd.) je taj što su okruženi morem, te nemaju velikih prepreka koje vjetar mora savladati pa se tako mogu razviti jako velike brzine vjetra. Dok su s druge strane Orah i Zelovo u potpunosti omeđeni planinama i brdima zbog čega vjetar ne doseže velike brzine pa se tako dobiju rezultati mnogo lošiji nego na otocima. No iz dobivenih rezultata u Prominama i Smokovljanima vidmo da nisu samo otoci pogodni za izgradnju vjetroelektrana nego su tu i priobalne lokacije do kojih vjetar s mora ima otvoren put, odnosno nema prepreka kao što su planine i brda.

Hrvatska svojim geografskim položajem ima ogroman energetski potencijal, što govori i podatak da u Hrvatskoj postoji 29 makrolokacija s povoljnim energetskim potencijalom, no oni trenutno nisu dovoljno iskorišteni. Iako pretvorba energije vjetra u električnu jako učinkovita, u Hrvatskoj se samo 8% godišnje potražnje električne energije pokriva tim izvorom, dok ostale zemlje sličnih geografskih karakteristika mnogo više iskorištavaju te pogodnosti, kao na primjer Danska koja sa svojih 19% udjela prednjači u Europi. Republika Hrvatska se nalazi tek na 18. mjestu u Europskoj uniji po instaliranoj snazi vjetroagregata, dok su države čiji je potencijal vjetra jednak ili čak i manji ispred nje, kao na primjer, Belgija, Austrija, Rumunjska i druge. Taj podatak nam govori kako Republika Hrvatska ima i dalje prostora i mogućnosti za napredak i bolje iskorištenje energije vjetra. [12]

LITERATURA

- [1] World Wind Energy Association – Statistics, <https://wwindea.org/information-2/information/>, 27. kolovoza 2019.
- [2] Vjetroelektrane.com, <http://www.vjetroelektrane.com/sto-je-vjetar>, 5. lipnja 2019.
- [3] Manwell J.F., McGowan J.G., Rogers A.L.: Wind Energy Explained, 2002, John Wiley & Sons, LTD
- [4] Obrada i analiza mjernih podataka za vjetar u urbanoj sredini dostupno na: <https://www.ieee.hr/download/repository/DR10PeroVukic.pdf???history=0&pfid=1&sampl=90&ref=0>
25. lipnja 2019.
- [5] Mukund R. Patel: Wind and Solar Power Systems, 1999, CRC Press
- [6] Linta S: Vjetroelektrane u Hrvatskoj, dostupno na: <https://repositorij.vuka.hr/islandora/object/vuka%3A103/datastream/PDF/view>, 2. rujna 2019.
- [7] New York Times, <https://www.nytimes.com/2017/01/15/world/asia/china-gansu-wind-farm.html>, 2. rujna 2019.
- [8] Explain That Stuff, <https://www.explainthatstuff.com/anemometers.html>, 26. lipnja 2019.
- [9] Beaufort Wind Scale dostupno na: <https://www.spc.noaa.gov/faq/tornado/beaufort.html>
12. lipnja 2019.
- [10] Energetski Institut Hrvoje Požar, <http://www.eihp.hr/awsercro/awsecp2.htm>, lipanj 2013.
- [11] Krivulja snage vjetroagregata Vestas V90 dostupno na: <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/16-vestas-v90#powercurve>
11. srpnja 2019.
- [12] Wind in power 2017, dostupno na: <https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/statistics/WindEurope-Annual-Statistics-2017.pdf>., 2. rujna 2019.

ŽIVOTOPIS

Ivan Zečević je rođen u Osijeku 13. studenog 1997. godine. U Odžaku u Bosni i Hercegovini je pohađao Osnovnu školu Vladimira Nazora. Nakon završetka osnovne škole upisuje gimnaziju u Srednjoj školi Pere Zečevića u Odžaku. Nakon završetka srednje škole upisuje Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku smjer elektrotehnika. Na drugoj godini prediplomskog studija odabrao je smjer elektroenergetika.