

# Usporedba performansi različitih tipova vjetroagregata

---

**Barbarić, Tomislav**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2021**

*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:200:887386>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-26**

*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**

**Usporedba performansi različitih tipova vjetroagregata**

**Završni rad**

**Tomislav Barbarić**

**Osijek, 2021.**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**Obrazac Z1P - Obrazac za ocjenu završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju**

Osijek, 16.09.2021.

Odboru za završne i diplomske ispite

**Prijedlog ocjene završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju**

|   |   |
|---|---|
| <b>Ime i prezime studenta:</b>  | Tomislav Barbarić   |
| <b>Studij, smjer:</b>   | Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija   |
| <b>Mat. br. studenta, godina upisa:</b>   | 4485, 23.07.2018.   |
| <b>OIB studenta:</b>  | 63284811712   |
| <b>Mentor:</b>  | Prof.dr.sc. Damir Šljivac   |
| <b>Sumentor:</b>  |   |
| <b>Sumentor iz tvrtke:</b>  |   |
| <b>Naslov završnog rada:</b>  | Usporedba performansi različitih tipova vjetroagregata  |
| <b>Znanstvena grana rada:</b>   | <b>Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)</b>   |
| <b>Predložena ocjena završnog rada:</b>   | Izvrstan (5)  |
| <b>Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:</b> | Primjena znanja stečenih na fakultetu: 2 bod/boda<br>Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 2 bod/boda<br>Jasnoća pismenog izražavanja: 2 bod/boda<br>Razina samostalnosti: 3 razina |
| <b>Datum prijedloga ocjene mentora:</b>   | 16.09.2021.   |
| <b>Datum potvrde ocjene Odbora:</b>   | 22.09.2021.   |
| Potpis mentora za predaju konačne verzije rada u Studentsku službu pri završetku studija:         | Potpis:   |
|   | Datum:  |

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA**

Osijek, 26.09.2021.

**Ime i prezime studenta:**

Tomislav Barbarić

**Studij:**

Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija

**Mat. br. studenta, godina upisa:**

4485, 23.07.2018.

**Turnitin podudaranje [%]:**

4

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Usporedba performansi različitih tipova vjetroagregata**

izrađen pod vodstvom mentora Prof.dr.sc. Damir Šljivac

i sumentora

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija. Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

# SADRŽAJ

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. UVOD .....</b>   | <b>1</b>  |
| <b>1.1. Zadatak završnog rada .....</b>                            | <b>1</b>  |
| <b>2. PREGLED PODRUČJA RADA .....</b>                              | <b>2</b>  |
| <b>3. OSNOVNI IZVOR ENERGIJE – VJETAR.....</b>                     | <b>4</b>  |
| <b>3.1. Faktori koji utječu na vjetar .....</b>                    | <b>4</b>  |
| 3.1.1. Nejednako sunčevo zagrijavanje .....                        | 4         |
| 3.1.2. Coriolisova sila .....                                      | 5         |
| 3.1.3. Lokalni geografski uvjeti .....                             | 6         |
| <b>3.2. Povijest primjene energije vjetra.....</b>                 | <b>6</b>  |
| <b>3.3. Statistika vjetra .....</b>                                | <b>7</b>  |
| <b>4. VJETROAGREGATI.....</b>                                      | <b>11</b> |
| <b>4.1. Aerodinamičnost vjetroturbine .....</b>                    | <b>12</b> |
| <b>4.2. Maksimalna snaga (energija) i iskorištenje vjetra.....</b> | <b>13</b> |
| <b>4.3. Izbor lokacije vjetroagregata – utjecaj terena .....</b>   | <b>16</b> |
| <b>4.4. Povijest primjene vjetroagregata .....</b>                 | <b>18</b> |
| <b>4.5. Podjela vjetroagregata.....</b>                            | <b>21</b> |
| 4.5.1. Podjela prema osi vrtnje .....                              | 21        |
| 4.5.2. Podjela prema snazi .....                                   | 23        |
| 4.5.3. Podjela prema vrsti generatora .....                        | 23        |
| 4.5.4. Podjela prema brzini vrtnje.....                            | 23        |
| 4.5.5. Podjela prema lokaciji .....                                | 24        |
| <b>5. TRENUTNI RAZVOJ TEHNOLOGIJA VJETROAGREGATA .....</b>         | <b>25</b> |
| <b>5.1. Statistika za prethodnu godinu .....</b>                   | <b>25</b> |
| <b>5.2. Najveći proizvođači vjetroagregata.....</b>                | <b>27</b> |
| <b>5.3. Današnja tehnologija proizvodnje.....</b>                  | <b>27</b> |
| <b>5.4. Vladari na tržištu u protekloj godini.....</b>             | <b>29</b> |
| 5.4.1. Vestas .....  | 30        |
| 5.4.2. GE Renewable Energy.....                                    | 33        |
| 5.4.3. Goldwind .....  | 35        |
| 5.4.4. Envision.....   | 36        |

|  |  |
|--|--|
| 5.4.5. Siemens Gamesa.....   | 37   |
| 5.4.6. Mingyang.....   | 39   |
| <b>5.5. Usporedba današnjih vjetroagregata .....</b>   | <b>40</b>  |
| <b>5.6. Mali vjetroagregati na trenutnom tržištu .....</b>   | <b>41</b>  |
| <b>6. ODABIR OPTIMALNE VELIČINE VJETROAGREGATA NA MIKROLOKACIJI<br/>VJETROELEKTRANE OTRIC' .....</b> | <b>46</b>  |
| <b>7. ZAKLJUČAK.....</b>   | <b>52</b>  |
| <b>LITERATURA .....</b>  | <b>Pogreška! Knjižna oznaka nije definirana.</b> |
| <b>SAŽETAK.....</b>  | <b>Pogreška! Knjižna oznaka nije definirana.</b> |
| <b>ABSTRACT .....</b>  | <b>Pogreška! Knjižna oznaka nije definirana.</b> |
| <b>ŽIVOTOPIS.....</b>  | <b>Pogreška! Knjižna oznaka nije definirana.</b> |

# 1. UVOD

Zbog sve veće zabrinutosti oko globalnog zatopljenja, zagađenja okoliša i sigurnosti energije, došlo je do značajnog povećanja interesa vezanih za razvoj i napredak obnovljivih, time i ekološki prihvatljivih izvora energije poput vjetra, sunca, vode, biomase, bioplina i slično. Navedeni oblici energije postaju vrlo važni i sve više primjenjivani kao načini proizvodnje električne energije koja je neophodna, ali i dalje se u velikim količinama ona proizvodi putem termoelektrana koje imaju ograničene resurse i značajno zagađuju okoliš. Svi ti problemi koje donose takvi načini proizvodnje električne energije utjecali su upravo na sve višu primjenu obnovljivih izvora i tako danas postoje razne izvedbe pogona i postrojenja kao što su solarne ćelije, vjetroagregati, hidroelektrane i ostalo. Naravno, nijedno od ovih postrojenja nije u potpunosti iskoristivo te ima svoje mane, no razvojem i stalnim usavršavanjem pridonosi se povećanju stupnja korisnosti. Ono što je još jako bitno jest da neka postrojenja ovise i o višoj sili, jer primjerice vjetar nije uvijek prisutan a ni Sunce ne sija čitavo vrijeme. Ako na nekom mjestu ne postoji dovoljan broj sunčanih sati, onda se govori o neisplativosti za takvo ulaganje, isto je i s vjetrom. Za proizvodnju električne energije posredstvom vjetra koriste se naprave koje se nazivaju vjetroagregati. To su rotirajući strojevi koji najprije pretvaraju kinetičku energiju vjetra u mehaničku, a zatim se električnim generatorom mehanička energija pretvara u električnu. Skup tako blizu smještenih vjetroagregata do kojih dopire isti vjetar čini vjetroelektranu, samim time su vjetroagregati priključeni (u većini slučajeva) na isti elektroenergetski sustav. Ovakva postrojenja jako su dobra rješenja u pogledu globalnog zatopljenja i zagađenja okoliša, te uporabom istih pridonosi se smanjenju štetnih emisija ugljik dioksida, sumpor dioksida, raznih oksida dušika i ostalih pratećih otpada koji se pojavljuju u tradicionalnim termoelektranama a također i radioaktivnog otpada nuklearnih elektrana. Kako se već može i zaključiti, energija vjetra se smatra jednom od energija koje najviše obećavaju i na koje se čovječanstvo sve više oslanja, što se odražava posljednjih nekoliko desetljeća. U ovom radu govori se o energiji vjetra, njegovom iskorištenju za proizvodnju električne energije i načinima na koji se to može ostvariti putem različitih izvedbi takvih postrojenja.

## 1.1. Zadatak završnog rada

Zadatak ovog završnog rada je objasniti osnove dobivanja električne energije posredstvom energije vjetra i usporediti trenutno stanje i tehnologiju naprava koje omogućavaju proizvodnju električne energije preko vjetra, odnosno vjetroagregata. Osim toga cilj je pokazati i trenutno stanje i potencijal ovakvog načina dobivanja električne energije i kako je tekao razvoj industrije kroz godine te u kojem smjeru napredak ide, koje prednosti i nedostatke očekivati u budućnosti.

## 2. PREGLED PODRUČJA RADA

Postoje mnoge podjele vjetroagregata i usporedbu je moguće napraviti na više načina. U nastavku su predstavljeni primjeri koji obrađuju srodne teme i uspoređuju tipove vjetroagregata.

Sveučilište Damsgard u Njemačkoj provelo je istraživanje na temu „Usporedba vjetroagregata obzirom na njihovu proizvodnju energije“. [1] U radu je izvršena usporedba vjetroagregata vezano za odnos energije koju proizvode. Objašnjavaju kako je važno osigurati da će vjetroagregat raditi na nazivnoj snazi pri jakim udarima vjetra a to se postiže raznim aerodinamičkim postupcima da se izbjegnu jaka naprezanja na komponentama. Postoje dvije opcije regulacije a to su *stall* i *pitch*. Prva je takva da se regulacija snage vjetroturbine vrši korištenjem aerodinamičkog efekta poremećenog trokuta brzina (engl. *stall*), druga omogućuje regulaciju kuta zakretanjem lopatica (engl. *pitch*). [1] Simulacijom i istraživanjem pokazali su da vjetroagregati s promjenjivom brzinom vrtnje imaju veću proizvodnju u rasponu od 3 do 28% u odnosu na najjednostavnije vjetroagregate stalnih brzina. Najveća razlika u postotcima je onda kada je kroz godinu niska prosječna brzina vjetra i tada dominiraju vjetroagregati s promjenjivom brzinom vrtnje. Također došli su do zaključka da takvi vjetroagregati proizvode električnu energiju više kvalitete jer se udari vjetra mogu pohraniti na rotirajućim lopaticama. [1]

Sveučilište iz Malezije izvršilo je usporedbu vjetroagregata s horizontalnom i vertikalnom osi vrtnje. Postoje dva osnovna tipa s vertikalnom osi a to su Darrieusova tip i Savoniusov tip. Općenito ovakvi vjetroagregati su pristupačniji i postavljaju se niže a time se omogućuje i postavljanje svih bitnih dijelova bliže tlu a ne u gondolu. No vjetrovi su manjih brzina što su bliže tlu, pa se time i proizvodi manje energije. [2] Naglašavaju kako je još jedna od velikih prednosti ovakvih vjetroagregata što mogu iskoristiti vjetar iz svih smjerova. Još neke od prednosti jesu da se mogu postaviti puno bliže jedna drugoj u vjetroelektranama, tiše su i također rade manje naprezanje na potpurnu strukturu. Vjetar koji im je potreban je također manje snage za razliku od onih s horizontalnom osi vrtnje, pa se i mogu postavljati bliže tlu. No postoje i nedostaci ovakvih izvedbi. Tako se javljaju problemi s radom ako se pojave olujni vjetrovi. Stvaraju iznimno nizak startni moment, a također imaju i probleme s dinamičkom stabilnošću. Zbog postavljanja na niže visine javljaju se ograničenja u radu s obzirom na nisku brzinu vjetra. Lopatice ovakvih vjetroturbina izloženi su većem broju sila i time su ovakve izvedbe manje pouzdane. [2] U radu naglašavaju kako je za primjerke sa horizontalnom osi vrtnje najvažnije da uvijek budu okrenuti u smjeru vjetra ili od smjera vjetra ovisno od tipa. Spominju kako kroz povijest postoje tri osnovna tipa horizontalnih vjetroagregata a to su oni iz 12. stoljeća sa 4 lopatice, oni iz 19. stoljeća sa više



lopatica i tradicionalne današnje sa 3 lopatice za komercijalnu upotrebu. Korištenje ovakvih izvedbi ima niz prednosti. Prije svega, promjenjivi nagib lopatica koji se koristi za horizontalne vjetroturbine omogućuje prikupljanje maksimalne količine energije od vjetra. Drugo, veću učinkovitost nudi horizontalna vjetroturbina jer ima lopatice okomite na smjer vjetra i stoga prima više energije za rotaciju. Treće, tradicionalni dizajn omogućuje jednostavnu instalaciju i jednostavno održavanje. U radu ističu važnost obadviju izvedbi jer svaka ima svoje primjene. Ipak najčešće se koriste i instaliraju vjetroagregati s horizontalnom osi jer je njihova učinkovitost čak oko 60%. [2]

Još jedno istraživanje sprovedeno je na Sveučilištu u Iraku pod temom „Analiza performansi vjetroturbina pod utjecajem različitih parametara“. [3] U radu su korišteni simulacijski modeli za proučavanje performansi malih energetske sustava na temelju različitih vremenskih parametara. Na ovom Sveučilištu zaključuju da na performanse vjetroagregata utječu mnogobrojni parametri poput gustoće i tlaka zraka, temperatura i duljina lopatica. Analizirali su matematičke rezultate vezane za navedene parametre kako bi se odredila ovisnost izlazne snage o ulazu. Korišten je računalni software Matlab. Radnja je vršena s ciljem izračuna točnog utjecaja parametara zraka na mehaničku snagu koja zapravo postaje izlazna električna snaga, kako bi se za neku lokaciju s poznatim parametrima mogla izračunati isplativost ulaganja. Nakon sprovedene analize oni zaključuju da se istraživači moraju potruditi i kao najveći prioritet staviti parametre okoliša jer priroda utječe na količinu proizvodnje električne energije bez obzira kakav agregat bio. [3]

### **3. OSNOVNI IZVOR ENERGIJE – VJETAR**

Energija vjetra je zapravo pretvoreni oblik sunčeve energije koja nastaje nuklearnom fuzijom vodika u helij na njegovoj površini. Ovaj fuzijski proces dovodi do stvaranja topline i elektromagnetno zračenje djeluje od Sunca u svim smjerovima u svemir. Iako samo mali dio takvog zračenja dolazi na zemlju, ono predstavlja veliku količinu energije koja je skoro dovoljna da zadovolji potrebe za energijom na Zemlji. [4] Samo nastajanje vjetra je zapravo složen proces. Za vjetar možemo reći da je to strujanje zraka određeno smjerom i brzinom. Zračne mase se gibaju u atmosferi kao posljedica razlike tlaka. [4] Površina zemlje se neravnomjerno zagrijava (sporije zagrijavanje/hlađenje mora, različit reljef) i stoga dolazi do različite temperature u pojedinim zračnim slojevima. Time se uzrokuje i gradijent tlaka te na kraju imamo gibanje zračnih masa. Iz ovoga se također vidi da vjetar proizlazi iz energije sunca, kao što je i objašnjeno. Vjetar struji od mjesta višeg tlaka prema mjestu nižeg tlaka. Što je veći gradijent atmosferskog tlaka, veća je brzina vjetra, time je veća i energija vjetra koja se može iskoristiti korištenjem vjetroturbina. Samo nastajanje i kretanje vjetra je pojava koja ovisi od mnogih faktora, među kojima su najbitniji nejednako sunčevo zagrijavanje, Coriolisova sila povezana sa zemljinom rotacijom te geografski uvjeti. [4]

#### **3.1. Faktori koji utječu na vjetar**

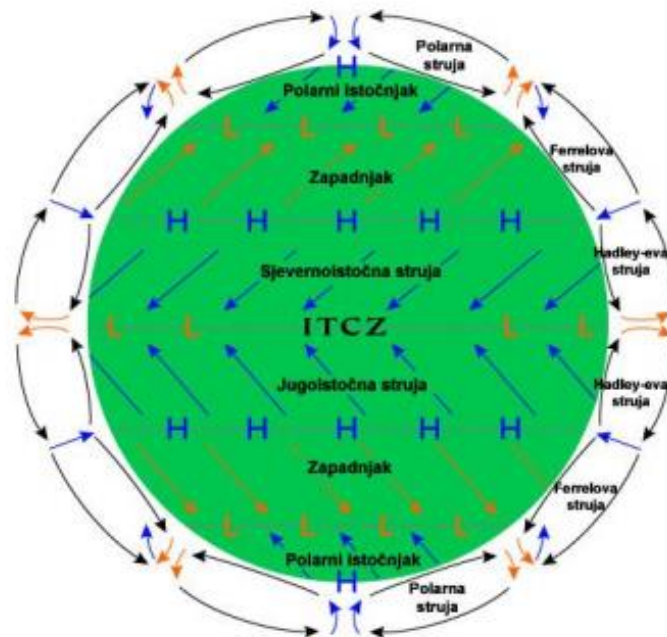
##### **3.1.1. Nejednako sunčevo zagrijavanje**

Od svih faktora koji utječu na stvaranje vjetra, nejednako sunčevo zračenje na zemljinoj površini je jedno od najvažnijih. Ovoj pojavi nejednakog zračenja mogu se pripisati četiri razloga. [4] Kao prvo, zemlja je sfera koja kruži oko sunca u istoj ravnini kao i njen ekvator. Površina zemlje je na ekvatoru okomita na putanju sunčevih zraka, ali je površina zemlje na polovima paralelna sa putanjom sunčevih zraka. Zbog toga ekvator prima najviše energije po jedinici prostora, a idući prema polovima ta se energija smanjuje. [4] Zbog prostorno neravnomjernog zagrijavanja na zemlji, formira se temperaturni gradijent od ekvatora prema polovima i tlačni gradijent od polova prema ekvatoru. Zbog toga, vrući zrak s manjom gustoćom na ekvatoru podiže se na veće visine atmosfere i pomjera se prema polovima dok hladniji zrak veće gustoće ide od polova prema ekvatoru duž zemljine površine. Drugi razlog jest taj da zemljina samo-rotirajuća os ima nagib od oko 23.5 stupnja u odnosu na ravninu ekliptike. [4] Taj nagib zemljine osi uzrokuje nejednako cikličko zagrijavanje za vrijeme okretanja oko sunca, što za posljedicu ima godišnji ciklus sezonske promjene vremena. Treći razlog je taj što je zemljina površina pokrivena različitim materijalima kao što su vegetacija, kamenje, voda, snijeg i tako dalje. Svaki od ovih materijala ima

drugačiji stupanj apsorpcije i refleksije sunčeva zračenja što dovodi da na nekim mjestima postoje visoke temperature (npr. pustinje) a na nekim vladaju niske temperature (ledene površine) čak i na istoj geografskoj širini. Četvrti, možda i najočitiji razlog nejednakog zemljinog zagrijavanja jest topologija zemljine površine. Postoje mnoge planine, uvale, doline, ravnice gdje nije isto zagrijavanje zbog osunčanih i sjenovitih strana. [4]

### 3.1.2. Coriolisova sila

Ugrubo se vjetrovi mogu podijeliti na dvije vrste. Vjetrovi koji se nalaze na velikim visinama (iznad 1000 m), na koje tlo skoro i ne utječe i koji pušu od ekvatora prema jugu i sjeveru zemlje nazivaju se globalnim. Uzrokovani su djelovanjem Coriolisove sile. [4] Ta sila posljedica je zemljine rotacije oko svoje osi i ona djeluje na smjerove vjetra na sjevernoj i južnoj zemljinoj polutci. Na slici 3.1. prikazani su globalni vjetrovi, te tri struje, odnosno zone koje nastaju zbog zemljine rotacije i nejednakog zemljinog zagrijavanja. Tu ubrajamo, idući od polova prema ekvatoru: Polarnu struju, Ferrelovu struju i Haleyevu struju. [4]

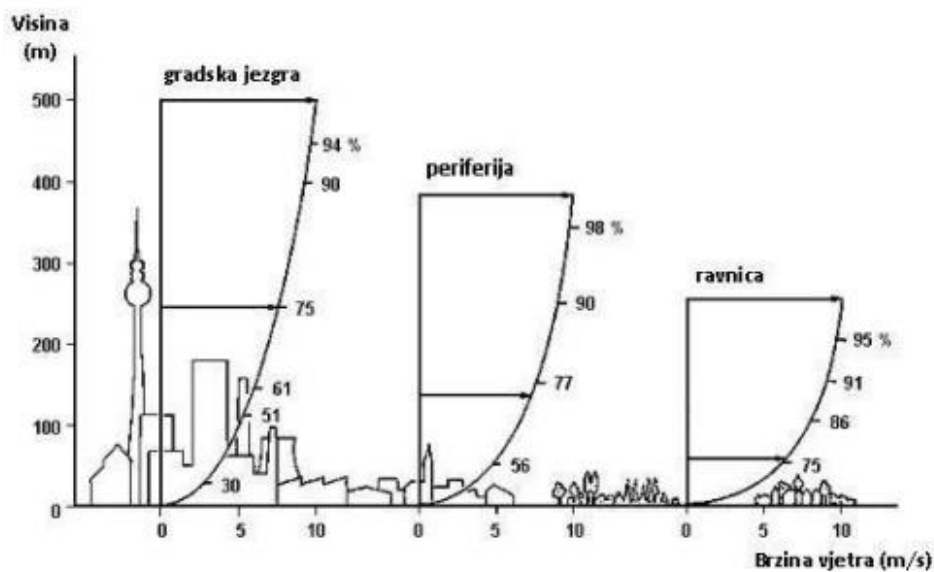


Sl. 3.1. Globalni vjetrovi i struje [4]

Druga vrsta vjetrova su oni koji pušu bliže površini zemlje, a nazivaju se lokalnim. U neku ruku lokalni vjetrovi zapravo ovise i o globalnim vjetrovima, ali najveći utjecaj na njih imaju reljef, vrsta i izgled terena, klima, temperaturna razlika mora i kopna na različitim lokacijama. [4]

### 3.1.3. Lokalni geografski uvjeti

Hrapavosti i nepravilnosti na površini zemlje su posljedica prirodnog djelovanja ali i struktura koje su načinili ljudi. Hrapavost terena utječe na vjetar tako što pruža otpor i time se on usporava. Može se zaključiti da ravne površine, ceste pružaju najmanji a veliki gradovi najveći otpor vjetru. Sila trenja i prepreke u blizini zemljine površine usporavaju vjetar. Također neke posebne geografske strukture mogu utjecati na značajno pojačanje brzine vjetra, primjerice prolazak vjetra kroz planinske prijevoje može uzrokovati stvaranje jakih planinskih vjetrova. [4]

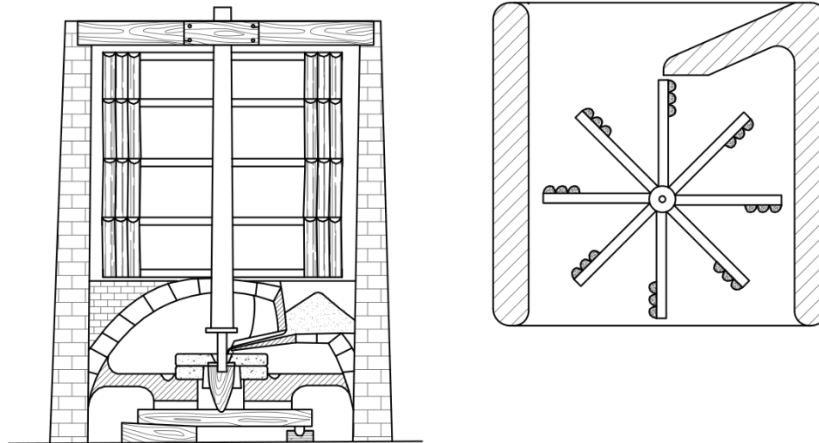


Sl. 3.1. Brzina vjetra u ovisnosti o hrapavosti površine [4]

## 3.2. Povijest primjene energije vjetra

Tisućama godina unazad otkrivaju se znakovi korištenja energije vjetra u svim dijelovima planete Zemlje. Ljudi su od davnina spoznali potencijal takve energije i moć koju vjetar sa sobom nosi te se kroz stoljeća sve više davalo na značaju iskorištenja vjetra. [4] Jedno od najranijih korištenja je vjetar koji je služio za jedrenje. Prema izvorima, 4000 godina p.n.e. Kinezi su prvi dodali jedra svojim plovilima. Ubrzo nakon njih, isto su uradili i Egipćani na rijeci Nil. [4] Tako je započelo moderniziranje i razvijanje plovila. Takvi jedrenjaci bili su glavni oblik transporta robe i ljudstva vodenim putem. Još jedna od davnih uporaba vjetra jest za radnje taljenja i topljenja metala, gdje su se uz pomoć vjetra temperature u improviziranim pećima podizale i do 1100 stupnjeva. [4] U regiji Sistan, u blizini Irana i Afganistana, pojavile su se vjetrenjače s vertikalnom osi koje su se koristile za mljevenje zrna i pumpanje vode i takav tip proširio se na područje Azije i Bliskog istoka. Oko 1180. godine u Europi na sjeverozapadu, pojavljuje se novi tip vjetrenjača, sa

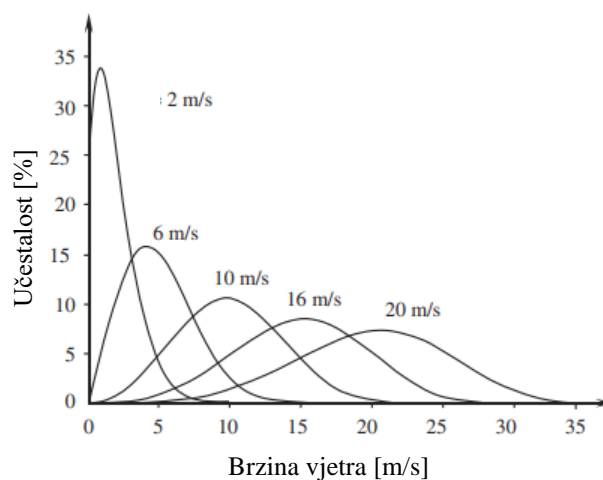
horizontalnom osi. Vjetrenjače s horizontalnom osi postale su dominantne u Europi i Sjevernoj Americi dugi niz stoljeća zbog svoje veće radne učinkovitosti i prednosti u odnosu na vjetrenjače s okomitom osi. [4]



Sl. 3.2. Prva praktična vjetrenjača iz regije Sistan [5]

### 3.3. Statistika vjetra

Kao što se može i pretpostaviti, najveći utjecaj ima brzina vjetra jer snaga ovisi o kubu iste. Vjetar ne treba biti samo jak, vrlo je važno da ga ima učestalo. Neki najpogodniji ishod bi bio vjetar koji puše jednakom brzinom, ali svaki dan. Takvih uvjeta nažalost nema, stoga se vrši promatranje brzine i učestalosti vjetra kroz neko vrijeme kako bi se uočile njegove karakteristike i time predvidjela mogućnost proizvodnje električne energije vjetroatragatom. To se radi Weibullovom funkcijom, odnosno razdiobom koja aproksimira podatke dobivene kroz dulji niz godina a kao rezultat daje vjerojatnost pojavljivanja neke brzine vjetra. [4]



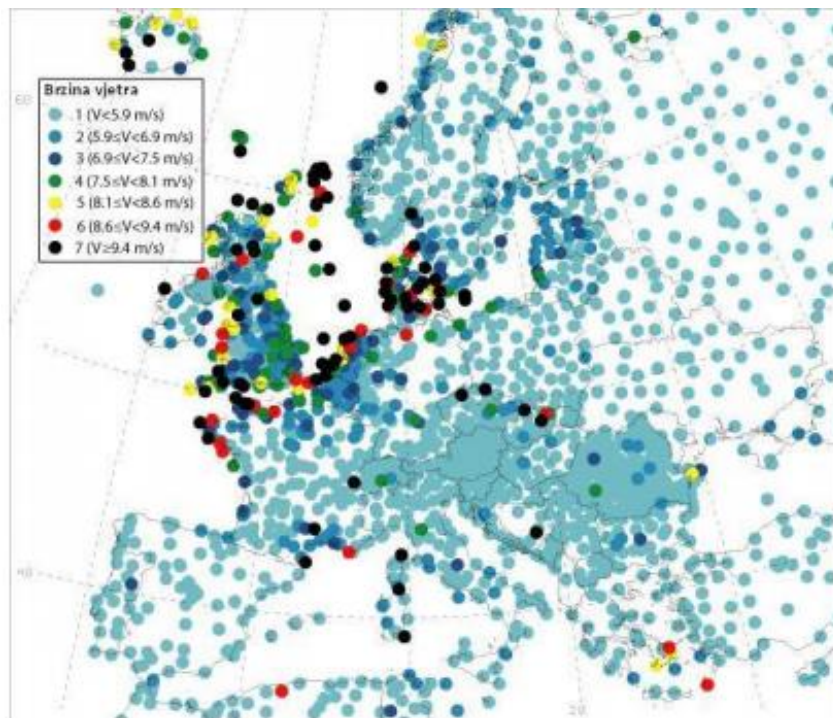
Sl. 3.4. Weibullova razdioba za različite brzine vjetra [4]

Za prikaz jačine vjetra koristi se Beaufortova ljestvica.

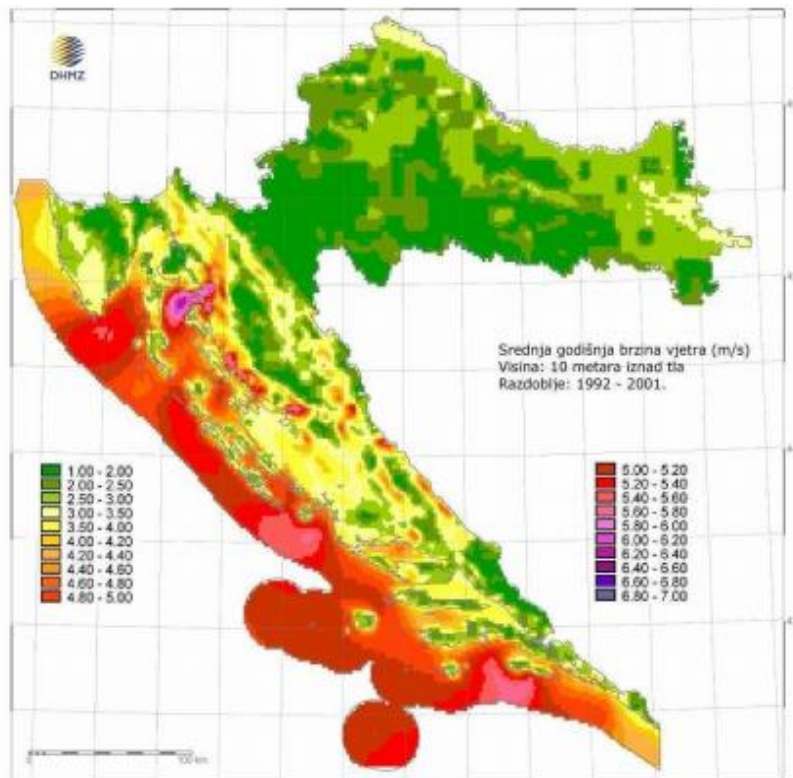
Tablica 3.1. Beaufortova ljestvica [6]

| Stupanj | m/s   | km/h    | čv    | Opis vjetra          |
|---------|-------|---------|-------|----------------------|
| 0       | 0-1   | 0-1     | 0-1   | tišina               |
| 1       | 2     | 2-5     | 2-3   | lahor                |
| 2       | 3-4   | 6-11    | 4-6   | povjetarac           |
| 3       | 5-6   | 12-19   | 7-10  | slab vjetar          |
| 4       | 7-8   | 20-28   | 11-15 | umjeren vjetar       |
| 5       | 9-11  | 29-38   | 16-21 | umjerenno jak vjetar |
| 6       | 12-14 | 39-49   | 22-27 | jak vjetar           |
| 7       | 15-17 | 50-61   | 28-33 | vrlo jak vjetar      |
| 8       | 18-21 | 62-74   | 34-40 | olujni vjetar        |
| 9       | 22-24 | 75-88   | 41-47 | oluja                |
| 10      | 25-28 | 89-102  | 48-55 | žestoka oluja        |
| 11      | 29-32 | 103-117 | 56-63 | orkanska oluja       |
| 12      | >32   | >118    | >63   | orkan                |

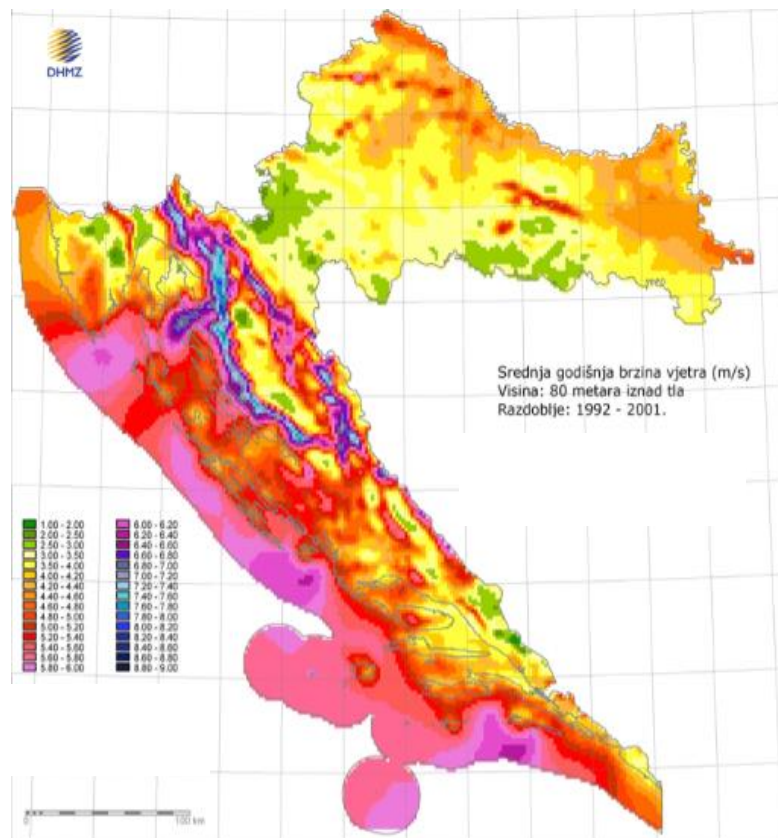
Atlas vjetra služi za davanje podataka o srednjim (očekivanim) brzinama vjetra na nekoj promatranoj lokaciji, a također prikazuje i očekivanu snagu energije po jedinici površine. Najčešće se formiraju temeljem brzine vjetra, ali se u obzir uzima srednja brzina vjetra i učestalost je već uračunata. [7]



Sl. 3.5. Atlas vjetra Europe (visina 80m) [7]



Sl. 3.6. Atlas vjetra Hrvatske (visina 10m) [8]

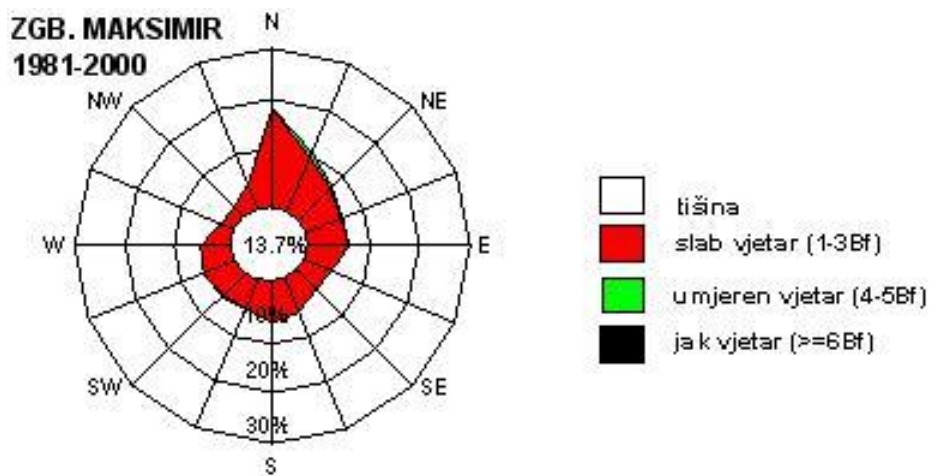


Sl. 3.7. Atlas vjetra Hrvatske (visina 80m) [8]



U mjestima najdalje od mora pušu najslabiji vjetrovi. Usporedbom Hrvatske sa sjeverom Europe, situacija nije baš idealna. Na kopnu Hrvatske je relativno slab potencijal vjetra, dok je uz obalu djelomično bolja situacija što vidimo prema slici 3.6. . Najbolja situacija je na moru. Još jedan od načina grafičkog prikaza smjera i jačine puhanja vjetra jest ruža vjetrova, koja prikazuje razdiobu vjerojatnosti pojave vjetra određene brzine u određenom smjeru nastala mjerenjima na nekoj mikrolokaciji. [4]

Na slici 3.8. možemo vidjeti primjer ruže vjetrova za lokaciju Maksimir, Zagreb. [9]

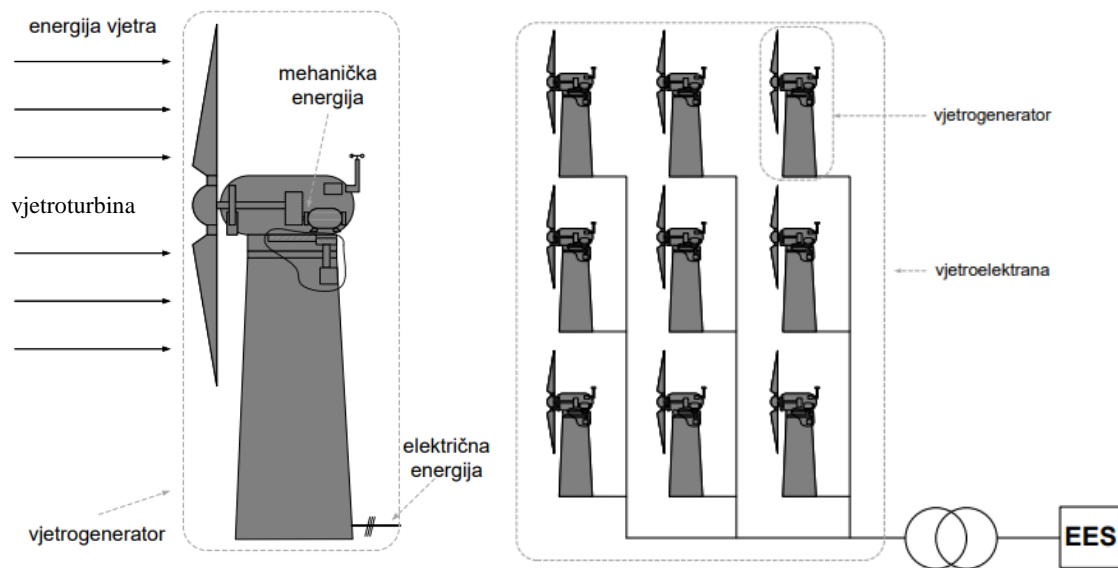


Sl. 3.8. Ruža vjetrova , Maksimir [9]



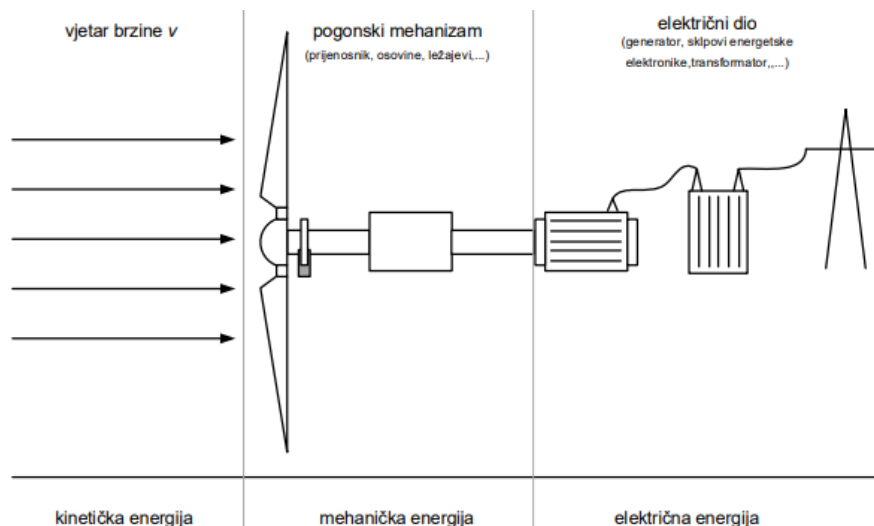
## 4. VJETROAGREGATI

Vjetroturbina (engl. *wind turbine*) je pogonski stroj koji kinetičku energiju vjetra pretvara u mehaničku energiju. Mehanička energija dobivena na vratilu rotora služi za pogon električnog generatora. Vjetroagregat (engl. *wind turbine generator* ili *wind generator*) je sustav koji kinetičku energiju vjetra pretvara u električnu energiju. Sastoji se od pogonskog stroja (vjetroturbine), generatora i ostalih komponenti koji zajedno čine jednu cjelinu. Umjesto izraza vjetroagregat često se koriste i nazivi vjetroturbina i vjetrogenerator. [10]



Sl. 4.1. Vjetroagregat i vjetroelektrana [10]

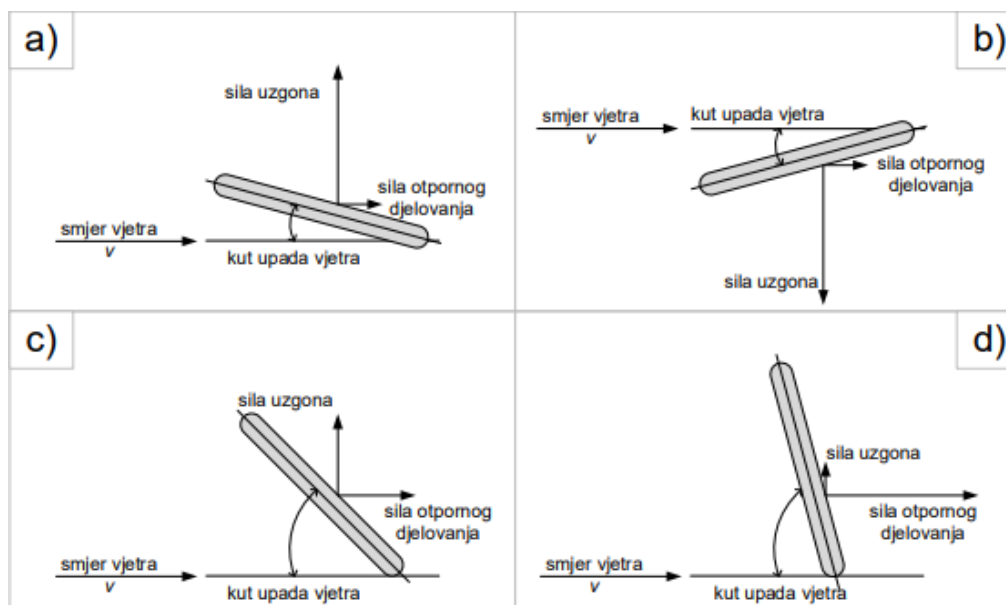
Niz blizu smještenih vjetroagregata koji su najčešće istog tipa predstavlja vjetroelektranu. To su postrojenja koja služe za pretvaranje kinetičke energije vjetra u električnu energiju. Kinetička energija se prenosi na lopatice rotora koji zakreće i pogoni osovину gdje se preko prijenosnika snage prenosi mehanička energija na osovину električnog generatora koji proizvodi električnu energiju. [10]



Sl. 4.2. Pretvorba energije u elektranama [10]

### 4.1. Aerodinamičnost vjetroturbine

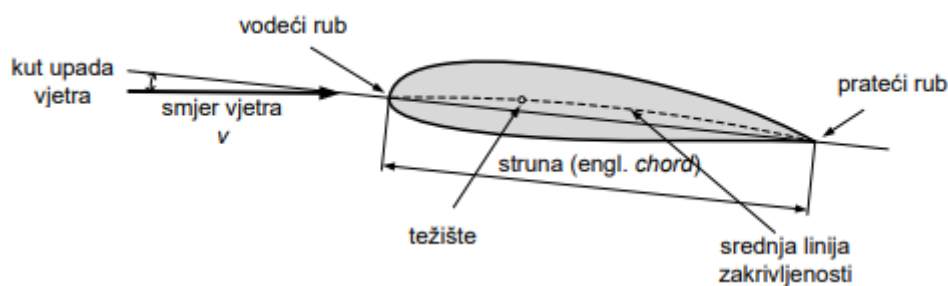
Jedan od glavnih ciljeva pri postizanju što idealnije vjetroturbine je osigurati što veću aerodinamičnost. Lopatice vjetroturbina imaju jako sličan aerodinamički profil kao krila zrakoplova. Stoga se situacija koja se događa pri letu aviona može provesti i na lopatice vjetroturbine. [10]



Sl. 4.3. Sile na lopicama vjetroturbine [10]

Sila na lopaticama vjetroturbine može se prikazati kao djelovanje dviju sila, odnosno sile otpornog djelovanja i sile uzgona (Slika 4.3.). Za postizanje dobrog aerodinamičkog profila lopatica, moraju se u što većoj mjeri ispuniti sljedeći uvjeti:

- zaobljen vodeći rub
- oštar prateći rub
- mali omjer debljine lopatice i duljine strune
- glatka površina
- veliki omjer sile uzgona i sile otpornog djelovanja [10]



Sl. 4.4. Poprečni presjek lopatica vjetroturbine [10]

## 4.2. Maksimalna snaga (energija) i iskorištenje vjetra

Energija vjetra je zapravo kinetička energija. Kako je i spomenuto, ovakva vrsta energije može se koristiti direktno za obavljanje mehaničkog rada ili indirektno za dobivanje električne energije. Kinetička energija postoji uvijek kada se predmet određene mase kreće nekom brzinom. Kada se zrak kreće, odnosno vjetar, energija je kinetička energija: [4]

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2 \quad (4.1.)$$

gdje je  $m$  masa zraka, a  $v$  prosječna brzina vjetra kroz određeno vrijeme. Snaga vjetra se može dobiti deriviranjem kinetičke energije po vremenu, dakle: [4]

$$P_w = \frac{dE_k}{dt} = \frac{1}{2} m' v^2 \quad (4.2.)$$

Oznaka  $m'$  predstavlja maseni protok. Ipak, samo dio snage vjetra se može pretvoriti u električnu snagu. Kada vjetar prolazi kroz vjetroturbinu i pokreće lopatice koje rotiraju, maseni protok vjetra je: [4]

$$m' = \rho Av \quad (4.3.)$$

gdje je  $\rho$  gustoća zraka (za izračun se koristi približno  $1,25 \text{ kg/m}^3$ ), a  $A$  površina kruga kojeg čini rotor u vrtnji. Ako se uvrsti ova jednadžbu u prethodnu dobivamo raspoloživu snagu vjetra: [4]

$$P_w = \frac{1}{2} \rho Av^3 = 0,625 * Av^3 \quad (4.4.)$$

Po ovoj jednadžbi vidi se da je za veću snagu/energiju vjetra potrebna veća brzina vjetra, veća duljina lopatica kako bi se ostvario veća površina kruga rotiranjem istih i veća gustoća zraka koja ovisi o nadmorskoj visini i temperaturi. Također bitna je i aerodinamika samih lopatica. Ipak maksimalna energija koja se može dobiti zračnom turbinom je  $16/27$  ( $0.59259$ ) ukupne energije vjetra. Razlog tomu je što zrak mora strujati i nakon prolaska kroz turbinu da bi se napravilo mjesta zraku koji dolazi (Albert Betz, 1919.). Betzov koeficijent ( $0.59259$ ) predstavlja maksimalnu učinkovitost vjetroturbine vjetroatregata. To znači da bi najidealniji vjetroatregat mogao iskoristiti 59% energije vjetra. Dakle, sva energija iz vjetra ne može se iskoristiti na vjetroturbini. Uzevši u obzir sve veličine i koeficijente djelovanja, formula za snagu vjetroatregata na priključcima generatora je: [10]

$$P_{va} = \frac{1}{2} \rho Av^3 C_p \eta_m \eta_g \quad (4.5.)$$

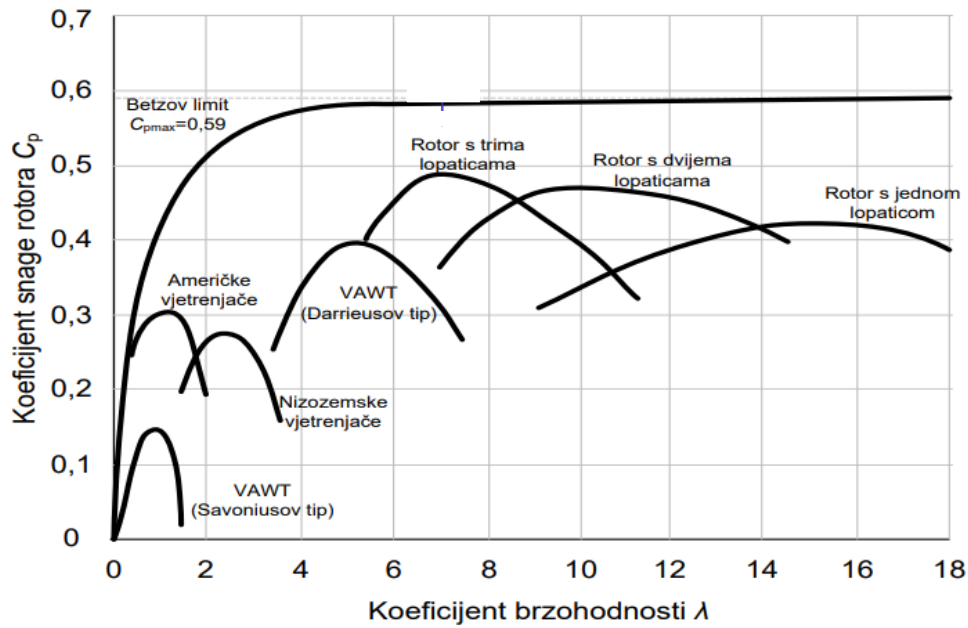
Ako se u formulu iznad ubace stupnjevi korisnog djelovanja koji iznose 0.8 za generator i 0.65 za zračnu turbinu, maksimalna snaga koja se može iskoristiti iz vjetra koju daje vjetroatregat ima ovaj oblik: [10]

$$P \approx \frac{16}{27} * 0,65 * 0,8 * 0,625 * Av^3 \approx 0,193 * Av^3 \quad (4.6.)$$

Kao što je ranije navedeno koeficijent  $C_p$  predstavlja u kojem postotku vjetroturbina iskorištava dostupnu snagu vjetra (maksimalno 59,3%). Promjenom kutne brzine  $\omega$  vjetroturbine i on se mijenja. Još jedan važan podatak je koeficijent brzohodnosti  $\lambda$  koji govori koliko puta je brzina vrha lopatice vjetroturbine veća s obzirom na brzinu kojom puše vjetar. [10]

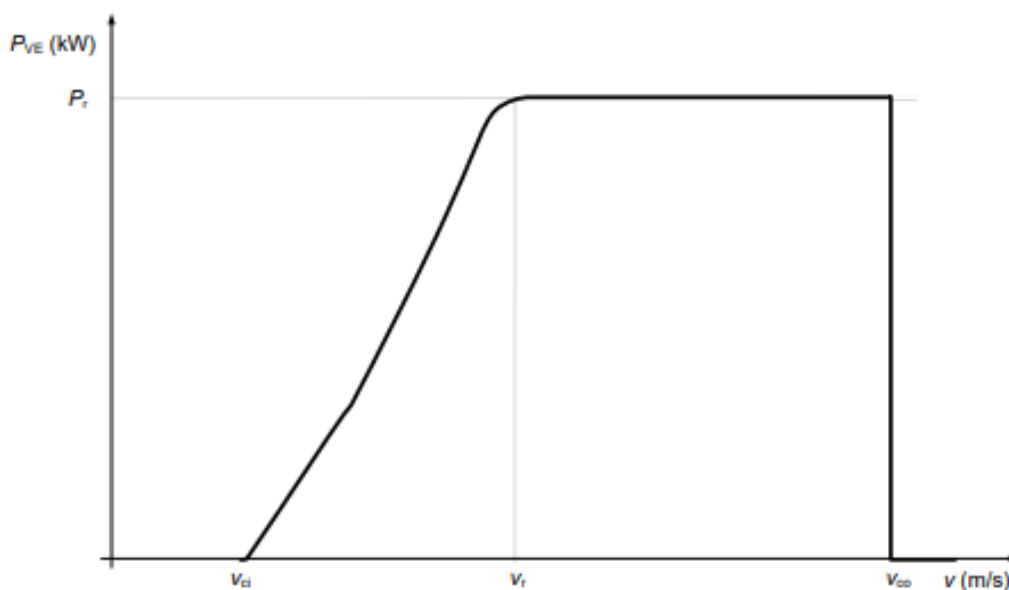
$$\lambda = \frac{r\omega}{v} \quad (4.7.)$$

gdje je  $r$  polumjer vjetroturbine,  $\omega$  kutna brzina vjetroturbine i  $v$  brzina vjetra.



Sl. 4.5. Koeficijent  $C_p$  u ovisnosti o brzohodnosti za različite tipove vjetroagregata [10]

Stupanj djelovanja vjetroelektrana otprilike iznosi 31% gledano u odnosu na kinetičku energiju vjetra. Za ukupnu dobivenu snagu vjetroagregatom uz to se još mora uračunati i gustoća zraka, površina kruga nastala rotiranjem lopatica i brzina vjetra. Za prikazivanje koliko snage će određeni vjetroagregat razviti pri različitim brzinama vjetra koristi se krivulja snage. [10]



Sl. 4.6. Krivulja snage vjetroelektrane u ovisnosti o brzini vjetra [10]

Prema slici 4.6. na krivulji snage bitne su četiri točke:

1. Brzina uključenja  $v_{ci}$  – kao što i samo ime kaže, pri ovoj brzini vjetroagregati započinju s proizvodnjom električne energije, a najčešće je u rasponu 3-5 m/s
2. Nazivna brzina  $v_r$ - brzina vjetra pri kojoj se postiže nazivna snaga vjetroagregata, najčešće raspona 11-15 m/s . Brzine vjetra iznad ove nazivne brzine nastoje se regulirati kako bi izlazna snaga ostala konstantna.
3. Brzina isključenja  $v_{co}$ - ove brzine vjetra dovode do isključenja vjetroagregata iz pogona radi sigurnosnih razloga i sprječavanja mehaničkih oštećenja, brzine raspona 20-25 m/s [10]

### **4.3. Izbor lokacije vjetroagregata – utjecaj terena**

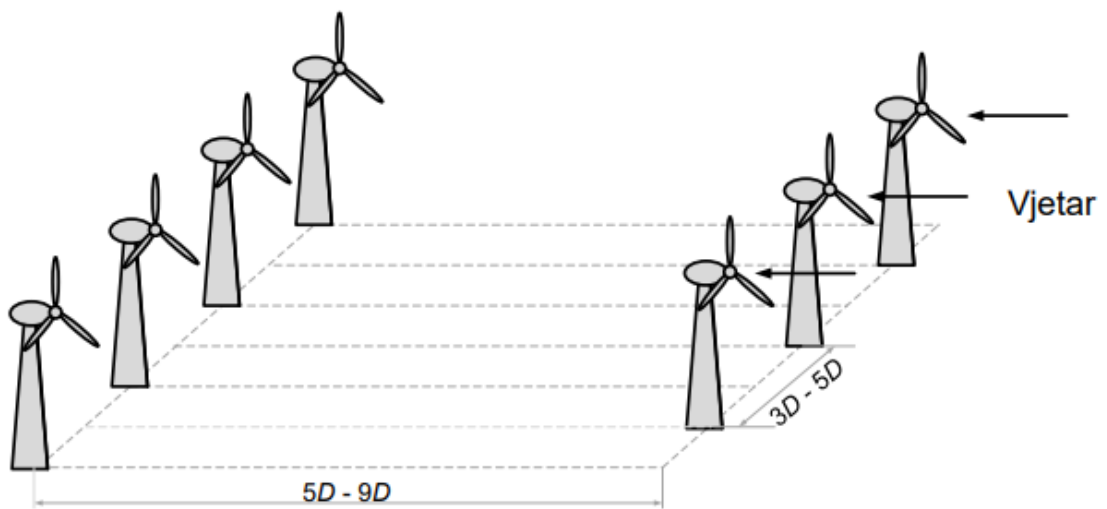
Kako je za proizvodnju električne energije ovakvim principom neophodan vjetar, jedan od najvažnijih uvjeta za smještanje vjetroagregata a time i vjetroelektrane na neku lokaciju jest da na njoj vjetar bude što prisutniji u svako doba dana. Danju ima više vjetra nego noću , ali je danju vjetar više nekontroliran. Kao što je i potrošnja električne energije u dnevnim satima veća, potrebno je da i veća proizvodnja iste bude s naglaskom za taj period. [10] Koliko se god proračuna i predviđanja provelo, vjetar je nepredvidiv i naglo mijenja brzinu i smjer. Kao što je i ranije spomenuto, trenje o hrapavosti na površini zemlje utječe na brzinu vjetra. Što nepravilniji teren to i manja brzina vjetra. Na kopnu postoji raznih površina sve od glatkih asfaltnih do nepravilnih gradskih područja. Jedna od najboljih lokacija na kopnu za smještanje vjetroelektrane jest duž obale. Što se tiče morskih površina, nepravilnosti na moru skoro da i ne postoje pa je vjetar relativno stabilan i konstantan. Ovakvi uvjeti pogoduju postavljanju vjetroagregata čiji su stubovi dosta niži od onih na kopnu i utječu na produljenje životnog vijeka vjetroturbina zbog manjih mehaničkih naprezanja. [10]

Postavljanjem više vjetroagregata u nizu, prvi djeluju na prilike vjetra koji odlazi na ostale. Brzina se smanjuje i povećava se turbulencija vjetra vjetroagregatima postavljenim iza. Ova pojava naziva se efektom zavjetrine. Zavjetrina utječe na proizvodnju u smislu da stvara gubitke energije vjetra, a smanjenje proizvodnje električne energije kreće se u rasponu od 2 do 20 posto. Na utjecaj ovog efekta se može djelovati međusobnim daljim postavljanjem vjetroagregata. To dovodi do drugih problema poput loše iskorištenosti prostora i većih troškova zemljišta i spajanja na mrežu. Razmještaj koji se pokazao najoptimalnijim kaže da se vjetroagregati na kopnu postavljaju 3 do 5 dužina promjera turbine okomito na smjer vjetra i 5 do 9 dužina promjera turbine u smjeru dolaska

vjetra, gledano za pravokutno razmještene vjetroparkove. Za vjetroparkove na pučini koriste se nešto veći razmaci. [10]



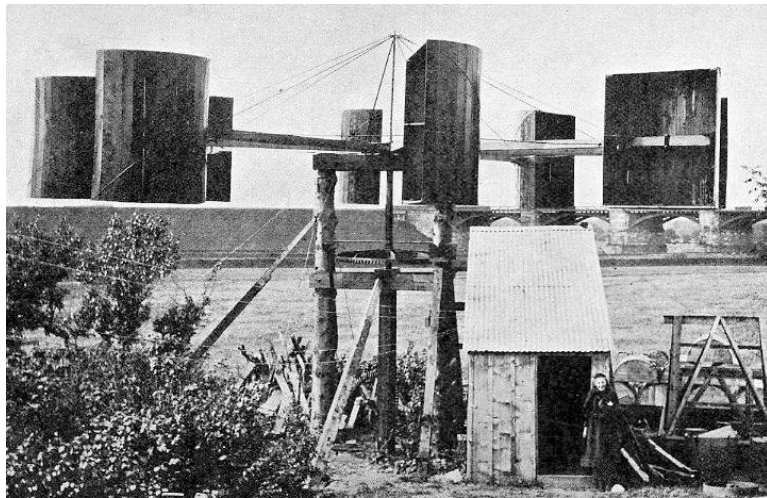
Sl. 4.7. Efekt zavjetrine, vjetropark na pučini [11]



Sl. 4.8. Optimalni razmještaj vjetroatregata [10]

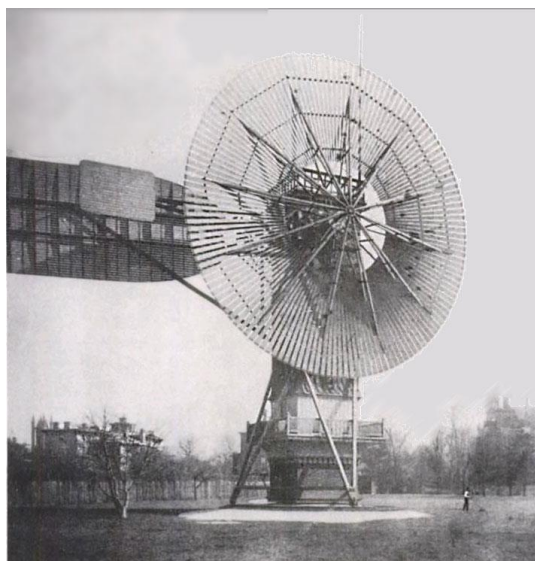
#### 4.4. Povijest primjene vjetroagregata

U Škotskoj je 1887. godine izrađen prvi vjetroagregat koji je služio za proizvodnju električne energije. Izumio ga je prof. James Blyth, visok 10 metara s jedrima od platna, smješten u dvorištu. Njegova kuća postala je prva kuća koja se napajala električnom energijom dobivenom vjetroagregatom, odnosno energijom vjetra. [12]



Sl. 4.9. Vjetroagregat Jamesa Blytha [13]

Charles Brush dizajnirao je i izgradio 1888. godine napredniji vjetroagregat. Vjetroturbina je imala promjer rotacije od 17 metara i sadržavala je 144 lopatice od cedrovine. Najveća snaga koju je davao bila je 12 kW i koristila se za punjenje istosmjernih baterija koje napajaju električne motore i rasvjetu. [4]



Sl. 4.10. Brushov vjetroagregat [12]



Od početka pa sve do sedamdesetih godina 20. stoljeća u prvi plan se stavljaju nafta i ugljen kao izvori energije. Njihova relativno niska cijena i velika dostupnost dovela je do usporenog pa čak i prestanka razvoja vjetroagregata i industrije iskorištenja energije vjetra. Ipak u nekim zemljama vjetar je bio glavni izvor energije, a jedna od takvih država je Danska koja je imala sedamdesetak vjetroagregata raspona snaga od 5 do 25 kW. Ova industrija razvija se i u Americi te se u idućim desetljećima izgradilo više desetaka tisuća vjetroagregata, a čak su postavljeni i u zabačenijim područjima Afrike pa i na Antarktiku. [12] Godine 1931. pojavljuje se vjetroagregat sa vertikalnom osi vrtnje koji je uvelike bio različit od onih sa horizontalnom osi vrtnje. Ovakva vjetroturbina dobila je naziv po izumitelju, Darrieusova turbina. Specifična izvedba omogućila je korištenje vjetrova iz svih smjerova. Sustav za zakretanje je nepotreban, a još jedna od pogodnosti jest da se generator mogao staviti niže, na zemlju. [12]

U SSSR-u se 1931. pojavljuje vjetroagregat jako sličan današnjim, sa horizontalnom osi vrtnje. Na visini od oko 30 metara nalazio se rotor s tri lopatice čiji je promjer također bio 30m a snaga koju je davao bila je 100 kW. Smatra se da mu je godišnji faktor opterećenja bio oko 32% što se ne razlikuje puno od današnjih. Radio je do 1942. godine. Prvi vjetroagregat čija je snaga bila preko 1 MW bio je Smith-Putnam, smješten u Vermontu u Americi. Nakon nešto više od 1100 sati rada, vjetroagregat snage 1.25 MW zbog puknuća lopatice prestaje s radom. Tek nakon 40ak godina ponovno se pojavljuju vjetroagregati takvih snaga i dimenzija. U Danskoj je 1957. izgrađen Gedser vjetroagregat snage 200 kW koji je poslužio i doprinio razvoju današnjih, modernih, a novost je bila aerodinamički način kočenja koji se zadržao i dan danas. [12]



Sl. 4.11. Gedser vjetroagregat [14]

Sedamdesetih godina 20.stoljeća fokus se opet stavio na vjetar i vjetroagregate. Do 1990. godine dolazi do sve većeg razvoja vjetroagregata i tržišta istih. Samostalni koji su se koristili na izoliranim područjima i farmama bili su većinom snaga od 1 do 25 kW, a tamo gdje je više jedinica proizvodilo energiju skupa instalirana snaga je iznosila od 50 do 600 kW. Jedan od najvećih centara instalirane snage gledajući po vjetroagregatima zasigurno je bila Kalifornija sa 700 MW ukupne instalirane snage i proizvodnjom od 3 TWh električne energije kroz godinu, dostatnu za napajanje grada sa 3 milijuna stanovnika. [12] U zadnjem desetljeću dolazi do sve većeg iskorištenja vjetra a samim time se razvijaju najmoderniji vjetroagregati , odnosno vjetroelektrane. U odnosu na one s početka 20.stoljeća, dimenzije današnjih su veće čak i do dva puta a sama snaga je veća za čak i 10 puta. S današnjom tehnologijom vjetar se sve više može iskorištavati i danas je on jedan od glavnih izvora energije. Svakom godinom raste ukupna instalirana snaga vjetroagregata čije su pojedinačne snage reda do čak 15 MW, a razvojem ove industrije otvaraju se i nova radna mjesta u svim dijelovima svijeta.



Sl. 4.12. Današnji vjetroagregati vjetroelektrane [15]

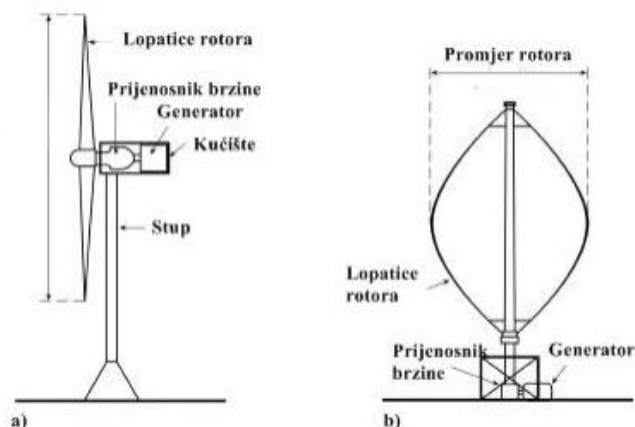
## 4.5. Podjela vjetroagregata

Vjetroagregati mogu se podijeliti na više načina i to :

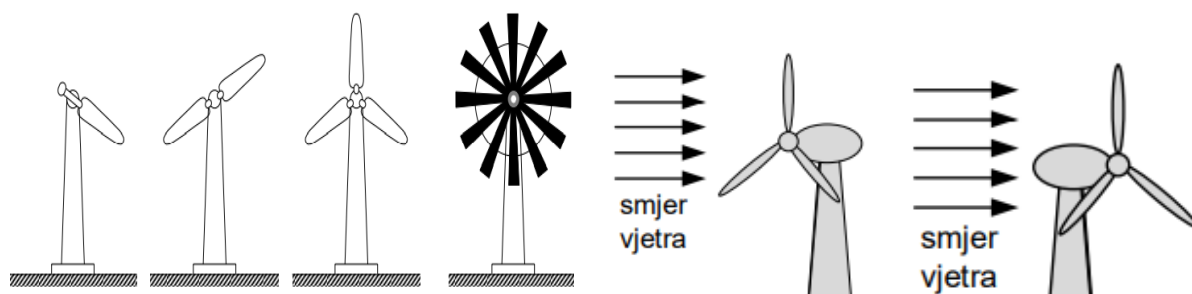
1. Prema osi vrtnje razlikujemo vjetroagregate s okomitom osi vrtnje i vjetroagregate s horizontalnom osi vrtnje
2. Prema snazi razlikujemo vjetroagregate male, srednje i velike snage
3. Prema vrsti generatora razlikujemo vjetroagregate s istosmjernim , sinkronim ili asinkronim generatorima
4. Prema brzini vrtnje dijele se na one sa stalnom brzinom vrtnje te na vjetroagregate promjenjive brzine vrtnje
5. Prema lokaciji postavljanja i instalacije dijele se na vjetroagregate na kopnu i vjetroagregate na pučini [10]

### 4.5.1. Podjela prema osi vrtnje

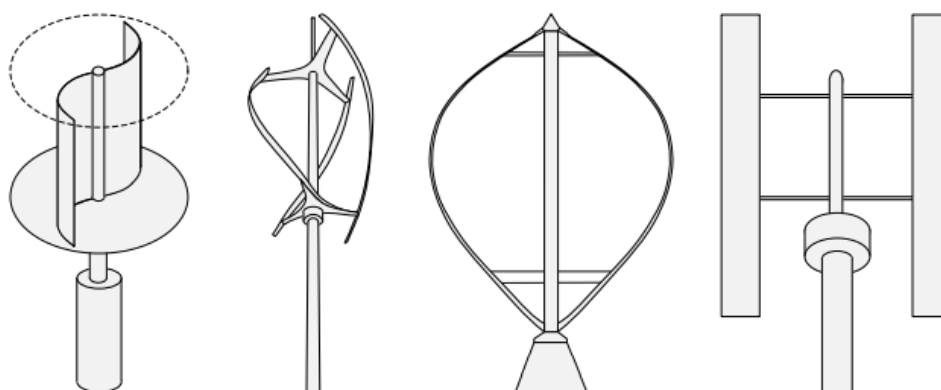
Ova podjela dijeli vjetroagregate prema načinu na koji je postavljena os vrtnje, odnosno osovina. Stoga postoje vjetroagregati s horizontalnom i okomitom osi vrtnje. Vjetroagregati s horizontalnom osi vrtnje mogu se međusobno razlikovati po više kriterija a to su broj lopatica, način zakretanja gondole , postavljanje uz ili niz vjetar te postoji li difuzor ili ne. Konvencionalni vjetroagregati veće snage koriste isključivo rotor s tri lopatice postavljen prije stupa vjetroagregata tj. uz vjetar. Postavljanjem osi vrtnje okomito, dobiva se prednost u vidu iskorištenja vjetra iz svih smjerova te je sustav za zakretanje nepotreban. Ovakvi vjetroagregati su pogodni za naseljenija mjesta jer su tiši, imaju manju brzinu vrtnje i neovisni su o smjeru vjetra. Stupanj djelovanja je niži nego kod onih s horizontalnom osi vrtnje. Postoji nekoliko osnovnih tipova ovih vjetroagregata kao što su Darrieusov tip, spiralni tip, Savoniusov tip i H-tip. [10]



Sl. 4.13. Vjetroagregat s : a) horizontalnom osi vrtnje b) okomitom osi vrtnje [10]



Sl. 4.14. Različiti tipovi turbina vjetroagregata s horizontalnom osi vrtnje [10]



Sl. 4.15. Različiti tipovi vjetroagregata s okomitom osi vrtnje [10]

Tablica 4.1. Prednosti i nedostaci vjetroagregata prema osi vrtnje [10]

|   | Prednosti   | Nedostaci  |
|---|---|--|
| Vjetroagregati s horizontalnom osi vrtnje | Veća učinkovitost, mogućnost regulacije kuta lopatica, veći stupovi omogućavaju pristup većim brzinama vjetra, ne trebaju dodatni pogon za pokretanje                 | Poteškoće s radom pri turbulentnim vjetrovima u blizini tla, visoki tornjevi i velike lopatice dovode do visokih troškova prijevoza, potreban sustav za zakretanje |
| Vjetroagregati s okomitom osi vrtnje      | Mogu se postaviti blizu tla bez potreba za visokim stupovima, nepotreban sustav za zakretanje, pogodni za razne lokacije gdje je zabranjena izgradnja visokih stupova | Stupanj djelovanja manji i za 50% u odnosu na VA s horizontalnom osi vrtnje, često potrebni dodatni sustavi za pokretanje rotora                                   |

#### **4.5.2. Podjela prema snazi**

Podjela se općenito svodi na male, srednje i velike vjetroagregate, no mogu se spomenuti oni mikro i ultra velike snage. Mikro snaga predstavlja snagu manju od nekoliko kilovata. One su pogodne za izolirana mjesta na kojim nije prisutan standardni mrežni priključak. Mali vjetroagregati su oni izlazne snage do 20 kilovata. Pogodne su za korištenje na farmama, raznim ruralnim područjima koji teže autonomiji. Višak proizvedene energije može se koristiti i davati dalje u mrežu. Najčešći tip jesu vjetroagregati srednje snage čija snaga ide u rasponu od 20 do 200 kilovata. Vjetroagregati koji proizvode snagu veću od 200 kW smatraju se agregatima velike snage. Današnja tehnologija omogućuje razvoj većih i jačih turbina, te su sve češći višemegavatni vjetroagregati a oni najveće snage postavljaju se na pučine radi dobrih uvjeta i iskorištenja potencijala takvog vjetra. [4]

#### **4.5.3. Podjela prema vrsti generatora**

Koristi se nekoliko osnovnih tipova trofaznih generatora poput:

1. Asinkroni generatori koji se dijele na : a) kavezne b) s namotanim rotorom i kliznim prstenovima
2. Sinkroni generatori koji mogu biti: a) s namotanim rotorom b) s permanentnim magnetom
3. Ostali tipovi poput visokonaponskih generatora i generatora s poprečnim tokom [10]

#### **4.5.4. Podjela prema brzini vrtnje**

1. Vjetroagregati sa stalnom brzinom vrtnje

Prednost ovakve izvedbe je mogućnost izravnog priključenja na mrežu i korištenje jednostavnih generatora čija je brzina vrtnje određena frekvencijom mreže. Nedostatak je optimalan rad samo za jedan omjer između brzine vrha elise i brzine vjetra.

2. Vjetroagregati sa promjenjivom brzinom vrtnje

Prednost ovakve izvedbe jest da je postignut optimalan rad za sve brzine vjetra. Ovakvi pogoni na godišnjoj razini postižu čak i do 30% veći iznos predane električne energije od onih sa stalnom brzinom vrtnje. No kod ovakvih sustava koji se spajaju na mrežu, potreban je pretvornik frekvencije što se smatra nedostatkom. Također su mnogo složeniji i skuplji u odnosu na one vjetroagregate s jednom brzinom vrtnje. [10]

#### 4.5.5. Podjela prema lokaciji

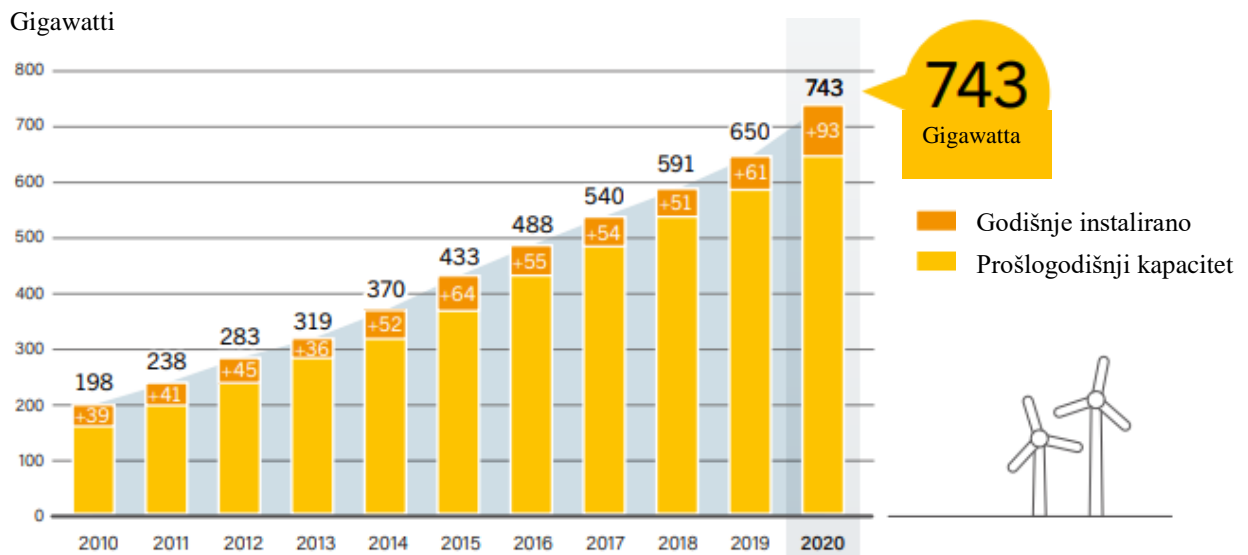
Međusobno se razlikuju vjetroagregati, odnosno vjetroelektrane instalirane na kopnu i vjetroelektrane instalirane na morskim površinama (*onshore* i *offshore*). Najčešće vjetroelektrane jesu kopnene čiji napredak i razvoj datira od davnina. Neke od prednosti kopnenih uključuju niže troškove temelja, stubova i postavljanja rotora, jednostavnija instalacija, lakše i jeftinije povezivanje s električnom mrežom te su problemi održavanja i popravljanja jednostavniji zbog lakšeg pristupa kopnu. Najčešće se vjetroagregati, odnosno vjetroelektrana na kopnu postavlja na brdovita područja, odnosno na vrhove i padine zbog ubrzanja vjetra. Vjetroelektrane na pučini su se od devedesetih godina više razvijale u odnosu na kopnene, jer se sve više koriste odlični uvjeti u pogledu vjetra na morskim površinama.

Vjetroagregati postavljeni na pučini ostvaruju veće izlazne snage i u pogonu su veći broj sati svake godine s obzirom na iste vjetroagregate postavljene na kopnu. Na otvorenom moru su i zahtjevi fleksibilniji, a primjer jednog takvog je buka koja na moru ne predstavlja problem dok se na kopnu nastoji ostvariti što tiši rad turbine. Sama instalacija vjetroagregata na moru je skuplja jer se postavljaju platforme i viši tornjevi. Proizvedena električna energija se prenosi podmorskim kabelima. Zbog specifičnijih uvjeta na moru, soli, jačeg vjetra i trošenja, cijena ulaganja i održavanja je visoka. Potrebna je posebna zaštita od korodiranja. Vjetroelektrane na moru broje velik broj pojedinačnih vjetroagregata koji se najčešće smještaju pravokutno te kao i na kopnu, tvore se 'parkovi vjetroelektrana'. [4]

## 5. TRENUTNI RAZVOJ TEHNOLOGIJA VJETROAGREGATA

### 5.1. Statistika za prethodnu godinu

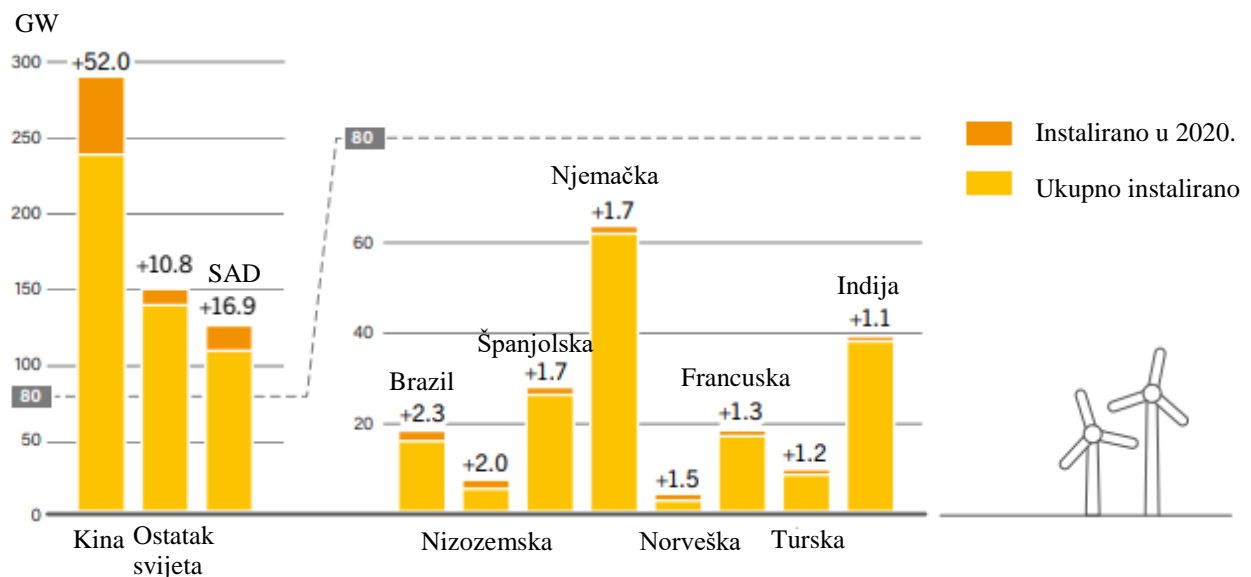
Procjenjuje se da je u 2020. godini instalirano novih 93 GW vjetroelektrana, od čega otprilike 87 GW na kopnu, najviše do sad, i 6 GW na pučini. Ovakvi rezultati su najviši dosad, premašujući za čak 45% dosadašnji rekord instalirane snage iz 2015. koji je iznosio 64 GW. Zbog pandemije corona virusa i njome povezanih mjera u prvim mjesecima razvoj i rad se usporio jer su brojna gradilišta bila zatvorena i otežan transport stvarao je probleme. Stvarale su se razne poteškoće te je dolazilo do odgode i pomjeranja izvođenja radova u mnogim zemljama i to pogotovo za postrojenja na kopnu. Unatoč svemu tome na kraju godine je ukupna svjetska instalirana snaga vjetroelektrana bila veća od one u 2019. za 14% i iznosila oko 743 GW. Trenutni kapacitet i instalirani kapacitet vjetroelektrana po godinama vidljiv je na slici 5.1.. [16]



Sl. 5.1. Instalirani kapacitet vjetroelektrana za razdoblje 2010.-2020. [16]

Vjetroelektrane osiguravaju značajan udio električne energije u sve većem broju zemalja. U 2020. godini čak 48% potrebe za električnom energijom u Danskoj pokrile su vjetroelektrane. Još neke države u kojim su vjetroelektrane pokrile više od 20 posto ukupne potrebe jesu Irska (38%), Ujedinjeno Kraljevstvo (24%), Portugal (24%), Njemačka (23%) i Španjolska (22%). Tu su još brojne države npr. Urugvaj i Nikaragva. Svjetski gledano, vjetroelektrane su zaslužne sa više od 6% ukupne proizvodnje električne energije. Država u kojoj su se najviše povećali kapaciteti instaliranih vjetroelektrana jest Kina. Nakon Kine slijedi SAD, Brazil, Nizozemska i Španjolska. Ovih pet država zajedno čine nešto više od 80% novoinstaliranog godišnjeg kapaciteta, a ogroman

udio otpada samo na Kinu i SAD i on iznosi skoro 74%. Na slici 4.2. prikazano je deset država s najvećim instaliranim kapacitetom vjetroelektrana u prošloj 2020. godini. [16]



Sl.5.2. Deset država s najvećim novoinstaliranim kapacitetom VE u 2020. [16]

Kina je imala svoju najbolju godinu u pogledu novih instaliranih kapaciteta bez obzira na odgađanja i problematiku vezanu za pandemiju ranije kroz godinu. Novoinstalirana 52 GW (49 na kopnu, 3 na pučini) je čak duplo više u odnosu na 2019. godinu. Osim Kine, na području Azije vjetroelektrane su se postavljale i u Tursku koja je instalirala skoro duplo više u odnosu na 2019. godinu. Indija je u tom segmentu zakazala, postigavši najmanji iznos novoinstalirane snage još od 2006. godine. Na području Amerika, kapaciteti su se proširili za 22 GW a 72% od toga instalirano je u SAD-u. Amerikanci su samo u posljednja 3 mjeseca 2020. godine instalirali veću snagu u odnosu na svaku pojedinu prethodnu osim 2012. godine.

U Europi se postavilo 13.8 GW novog kapaciteta, od čega oko 21% na pučini. Ipak pandemija je djelovala i kopneni kapaciteti su izvedeni ispod očekivanja. U Norveškoj je završen i kompletiran najveći vjetroпарк u Europi snage 1 GW, poluotok Fosen. Država s najvećim novoinstaliranim kapacitetima je Nizozemska s oko 2 GW dok je druga Španjolska sa 1.7 GW. Njemačka je na trećem mjestu ali gledano u odnosu na godinu ranije ostvaren je pad od 80% u instalaciji pučinskih vjetroelektrana. Na jugu, Australija je ostala najveći proizvođač i vjetar im je ponovno najkorišteniji obnovljivi izvor energije. Što se tiče instalacija na pučini, 5 država Europe, 2 iz Azije i SAD su sveukupno pridonijeli instalaciji 6.1 GW, tako da je novi sveukupno instalirani kapacitet oko 35.5 GW. Od svih novoinstaliranih vjetroelektrana u 2020. godini oko 6.5% je pučinskih.



Stavljanje turbina van pogona zbog dotrajalosti ili zbog drugih razloga činilo je ukupnu snagu od 0.5 GW. Najveća ukupna snaga izbačena iz pogona jest u Njemačkoj u iznosu od 222 MW. [16]

## **5.2. Najveći proizvođači vjetroagregata**

Tijekom godina mnogi proizvođači i dobavljači su se pojavili u industriji vezanoj za iskorištenje energije vjetra. Najveći broj bio je 2013. godine, čak 63. Idućih godina taj se broj polako smanjivao tako da se 2019. godine broj sveo na 33. Šest vodećih proizvođača vjetroagregata povezani su sa 75% kapaciteta vjetroelektrana instaliranog u 2020. godini. Ti proizvođači jesu Vestas (Danska), GE Renewable Energy (GE, SAD), Goldwind (Kina), Envision (Kina), Siemens Gamesa (Španjolska) i Mingyang (Kina). [16] Zajedno ovi proizvođači zaslužni su za instaliranje vjetroagregata ukupne snage 63 GW. Vestas je ostao među vodećim proizvođačima petu godinu zaredom, GE je profitirao od jakog domaćeg tržišta kao i Goldwind koji je po prvi puta isporučio više od 1 GW za inozemno tržište. Uznapredovali su Envision i Mingyang, a Siemens Gamesa je pao sa trećeg u 2019. na peto mjesto u 2020., ali su vodeći na tržištu koje je vezano za pučinske instalacije.

Kineski proizvođači zauzeli su 10 od prvih 15 mjesta zahvaljujući enormnom povećanju instalacija vjetroelektrana u Kini. Senvion i Enercon, oba proizvođača iz Njemačke, kao i Suzlon (Indija) koji su prošlih godina bili u najboljih deset, nastavili su s mučenjem zbog smanjenja prodaje i instalacije na domaćem tržištu. Čak su i najbolji proizvođači doživjeli velike gubitke kroz godinu, zatvaranje firmi i otpuštanje radnika iako su prodali relativno mnogo vjetroagregata. Uzrok tomu je velika konkurencija na tržištu u kombinaciji s povećanim troškovima i ograničenjima vezanim uz pandemiju. Granice profita su se stisnule i možda bi se u normalnim uvjetima ostvario solidan dobitak no zbog svih uvjeta i nepogodne situacije teže ga je ostvariti. Vestas i GE su izvijestili da su im zaprimljene narudžbe za nove vjetroagregate relativno pale u odnosu na prethodnu 2019. godinu. [16]

## **5.3. Današnja tehnologija proizvodnje**

Proizvođači su fokusirani na tehnološke inovacije koje se uglavnom zasnivaju na postojećim konceptima i konfiguracijama. Činjenica da skoro sva velika, odnosno glavna tržišta energijom vjetra jesu vođena dražbom stvorila je pritisak da se ova industrija razvija u smislu kontinuiranog smanjenja troškova i ostvarivanja najnižeg mogućeg odnosa uloženog u izvor energije i dobivene energije (engl. *Levelized cost of energy - LCOE*). Jedan od pratećih trendova zadnjih godina jest korištenje turbina s manjom specifičnom snagom odnosno manjim odnosom snage generatora i

površine kruga koju rotiranjem stvara rotor. To rezultira manjom proizvodnjom energije po metru kvadratnom površine tog kruga ali ima nekoliko prednosti koje pomažu u smanjenju *LCOE*-a , uključujući sniženje cijene generatora, štednje na drugim komponentama, a također i povećanja faktora iskorištenja i smanjenje varijacija izlazne snage, što utječe na izbjegavanje dodatnih troškova i povećava važnost proizvodnje vjetroagregata za električnu mrežu. [16]

Turbine za uporabu na kopnu i na pučini nastavljaju biti sve veće i više, omogućujući tako korištenje više energije vjetra kako bi proizvodnja iz takvih izvora bila što ekonomičnija na više lokacija. U 2020. predstavljeni su razni vjetroagregati pa su tako GE, Nordex (Njemačka), Siemens Gamesa i Vestas pokazali svoje kopnene vjetroagregate u rasponu od 5 do 6 MW. Nekoliko proizvođača je također predstavilo nove manje vjetroagregate za mjesta s manje vjetra, uključujući one namijenjene za tržište gdje vladaju posebni uvjeti u pogledu vjetra. Viši stupovi vjetroagregata i veće lopatice rotora utječu na svaki dio počevši od dizajna, proizvodnje, prijenosa i instalacije, ali i naravno s time povezane troškove. [16]

Da bi kompenzirao troškove povezane s prijevozom visokih stupova, Nordex je osmislio postrojenje koja se zasniva na mobilnosti te omogućava da se betonski stupovi proizvode i sastavljaju lokalno na potrebnoj destinaciji. Time se snižavaju troškovi logistike i udaljenosti prijevoza. Postrojenje se rastavlja i sastavlja na potrebnim lokacijama. U 2020. godini srednja snaga vjetroagregata koji su se nalazili na tržištu je za oko 2% bila veća nego 2019. godine. Vjetroagregati će kao i dosad samo nastavljati biti veći jer se proizvođači natječu proizvesti najveću i najjaču jedinicu, posebno za primjenu na pučinama. GE Renewable Energy je u 2020. godini povećao snagu njihovog Haliade-X prototipa na 13 MW, a kasnije i na 14 MW za upotrebu u vjetroelektrani na moru smještene stotinjak kilometara od istočne obale Engleske, gdje se instaliranje planira 2025. godine.

Najveći proizvođači dali su svoje vizije i objavili prototipe raznih vjetroagregata koji se planiraju staviti na tržište u idućih par godina. Vestas je prvi koji je proizveo 15 MW vjetroagregat početkom 2021. godine, a isti se može nadograditi do čak 17 MW. Veći vjetroagregati pogodniji su za pučinu i mnoge narudžbe već su napravljene za razne megavatne uređaje prošle godine. Ovakvi vjetrogeneratori veće snage s rotorima veće učinkovitosti znače da je manje takvih pojedinačnih uređaja potrebno za dobivanje iste i čak veće izlazne snage. Tamo gdje priobalna vjetroelektrana nije pogodna zbog vjetrova loših karakteristika teži se plutajućim vjetroelektranama (engl. *Floating wind turbines*). Ovako postavljeni vjetroagregati na plutajuću podlogu pogodni su za smještanje na mjestima gdje su vjetrovi najjači i najkonzistentniji. Plutajućim platformama se

omogućuje postavljanje vjetroagregata ne samo u priobalnom području gdje se doseže do čvrstog tla već puno dalje od obale. Dakako, troškovi su skoro duplo veći nego kod klasičnih priobalnih vjetroparkova ali nastavljaju padati kako tehnologija napreduje i kako se sprema proces komercijalizacije. Krajem 2020. godine Vestasovi vjetroagregati snage 9.5 MW postali su najveći do sad instalirani za upotrebu na plutajućoj platformi, u blizini Škotske obale.

Industrija korištenja pučinskog vjetra jako brzo napreduje, posebice plutajuće tehnologije te se mnoge ponajveće tvrtke vezane za naftu i plin sve više okreću ovim tehnologijama i kupuju dionice i vlasničke postotke. Cilj najvećih tvrtki vezanih za naftu u Europi jest imati oko 125 GW instaliranog kapaciteta iz obnovljivih izvora do 2030. godine, gdje najveći udio odnosi energija vjetra. [16] U 2020. godini Francuska je po prvi puta investirala u pučinske vjetroelektrane, stječući određene postotke u projektima smještenim u vodama Ujedinjenog Kraljevstva. Također su najavili planove za plutajuće instalacije u blizini Koreje. Italija je također investirala u ovu tehnologiju ostvarivši 20% udjela u Dogger Bank vjetroparku.

Jedan, pomalo začuđujući problem jest taj da se smatra da ova tehnologija toliko brzo napreduje da će instalacijska plovila za prijevoz velikih komponenata, velikih turbina i stupova, biti u nemogućnosti ispuniti zadatke transporta. Primjerice tako je krajem 2020. godine postojao samo određen broj plovila, njih 4, koja su mogla svladati vjetroagregate nove generacije poput GEove Haliade-X. Još jedno od pitanja na koje se odgovaralo u 2020. godini jest što uraditi sa potrošenom turbinom, kada za njenu zamjenu dođe vrijeme. Iako se većina turbina može koristiti u nekom drugom vjetroparku, njihova reciklaža je skupa jer su napravljene od složenih kompozitnih materijala. Korištene lopatice se primjerice sve više nastoje prenamijeniti za korištenje u svrhu zvukobrana. Također se sve više istražuju načini za njihovu reciklažu i ponovnu upotrebu kompozitnih materijala. [16]

#### **5.4. Vladari na tržištu u protekloj godini**

Kao što je navedeno ranije, najveći udio u instalaciji novih kapaciteta vjetroelektrana u 2020. godini imali su:

1. Vestas
2. General Electric (GE)
3. Goldwind
4. Envision
5. Siemens Gamesa
6. Mingyang [16]

### 5.4.1. Vestas

Vestas je Danska tvrtka koja se bavi proizvodnjom, prodajom, instalacijom i servisiranjem vjetroagregata. Osnovana je 1945. godine. Krajem šezdesetih godina 20. stoljeća fokus se stavlja na proizvodnju hidrauličkih dizalica koje su tada bile jako tražene. Slali su ih u čak 65 država širom svijeta. Sedamdesetih godina Vestas uviđa potencijal energije vjetra te se tehnologija pretvorbe iste u električnu energiju razvija u prostorijama tvrtke. [17] Kako bi izbjegli ismijavanje i čuđenje mušterija i dobavljača pokusi s vjetroturbinama izvode se u tajnosti. Pridružuju im se dva inženjera koji su imali ideju ali nisu imali novac za sprovođenje u gotov proizvod. Bio je to prototip uglavnom jako sličan današnjim vjetroturbinama. Prvi službeni vjetroagregat napravljen je 1979. godine. Prvi prodani i instalirani vjetroagregat imao je rotor promjera 10 metara snage 30 kW.

U Vestas-u su shvatili da postoje problemi u dizajnu nakon što se na vjetru jedan vjetroagregat raspao, odnosno lopatica se odvojila. Svi vjetroagregati dotad postavljeni su stali s radom i nastojalo se otkriti i riješiti problem. Problem je otkriven i tvrtka je počela sama sa proizvodnjom dijelova od fiberglasa kako bi se osigurala visoka kvaliteta u svim etapama proizvodnje. [17] U idućim godinama Vestas doživljava veliki uspjeh, vjetroagregati se masovno naručuju i firma broji oko 800 radnika. Zbog problema s dostavljanjem skoro dolazi do bankrota, jer korisnici koji su naručivali u velikim količinama, vjetroagregate koji nisu stigli na vrijeme nisu htjeli platiti. Ipak situacija se smiruje. Veliki napredak ostvario se 1990. godine kada se smanjuje težina lopatica sa skoro 4000 kg na samo 1000 kg. Vestas napreduje i potražnja za vjetroagregatima sve je veća. S postavljanjem vjetroagregata na pučinu kreće se 1995. u Danskoj, gdje je postavljeno 10 jedinica snage 500 kW. Integriranjem sa tvrtkom NEG Micon u jednu cjelinu, Vestas postaje neosporivi vođa na tržištu energije vjetra. Dotad svoju najbolju godinu u Vestas-u su imali 2008. godine, gdje se ostvario profit od 668 milijuna eura i otvorilo 5 524 radna mjesta.

Trideset tri godine nakon prvog instaliranog vjetroagregata, ukupni kapacitet instalirane snage iznosio je 50 GW. U idućim godinama sve do danas razvijali su se sve veći i napredniji vjetroagregati. Godine 2020. proslavljeno je 75 godina od osnutka. Trenutna instalirana snaga Vestas vjetroagregata iznosi preko 140 GW u 83 države, od čega preko 7 GW na pučini, a broj zaposlenih u ovoj tvrtki iznosi nešto više od 29 000. [17]

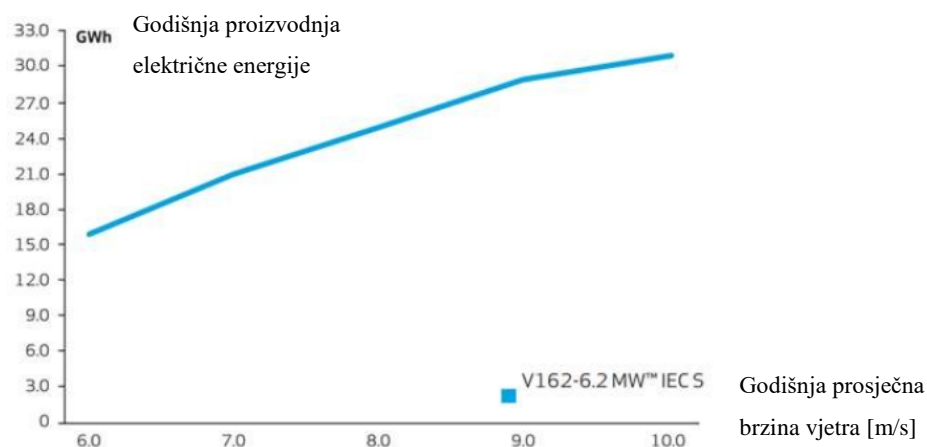


Sl. 5.3. Najveći kopneni Vestas vjetroagregat (V162-6.2 MW) [17]

Jedan od najnovijih i najvećih Vestas vjetroagregata za primjenu na kopnu je model V162 snage 6.2 MW. Površina kruga koju zatvaraju lopatice iznosi više od 20 000 metara četvornih. Koristi jedan od najvećih rotora čiji je promjer 162 metra. Pogodan je za razne vjetrove od malih do srednjih brzina a ima široku primjenjivost na velikim prosječnim brzinama vjetra i sve je to upareno sa velikim faktorom iskorištenja snage. Ovaj vjetroagregat predstavlja vrh današnje tehnologije. Primjere ovakvih jedinica možemo vidjeti na slici iznad (Slika 5.3.). [17]

Tablica 5.1. Tehničke specifikacije V162-6.2 MW . [17]

|                                   |   |
|-----------------------------------|---|
| Regulacija brzine lopatica        | Regulacija nagibom s promjenjivom brzinom |
| Nazivna snaga                     | 6 200 kW                                  |
| Brzina uključenja                 | 3 m/s                                     |
| Brzina isključenja                | 25 m/s                                    |
| Klasa vjetra                      | IEC S                                     |
| Raspon temperature                | -20°C do 45°C                             |
| Maksimalna jačina buke            | 104.8 dB(A)**                             |
| Promjer rotora                    | 162 m                                     |
| Površina kruga nastala rotiranjem | 20 612 m <sup>2</sup>                     |
| Gustoća snage                     | 300.8 W/ m <sup>2</sup>                   |
| Frekvencija                       | 50/60 Hz                                  |
| Pretvarač energetske elektronike  | Nazivne snage                             |
| Prijenosnik snage (brzine)        | Dva planetarna stupnja                    |
| Visina glavčine                   | 119 m / 125m / 166m / 169m                |
| Mjesto instalacije                | Kopno                                     |

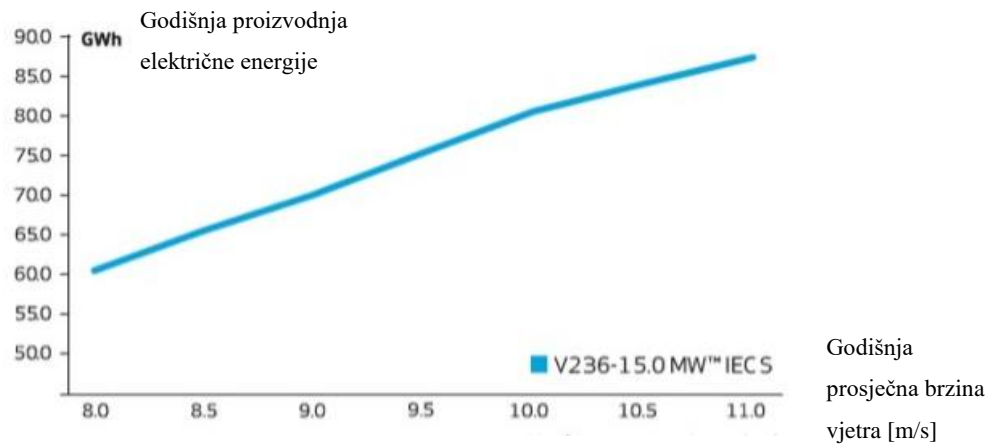


Sl. 5.4. Godišnja proizvodnja električne energije V162 vjetroagregata u ovisnosti o brzini vjetra [17]

Vjetroagregat kojim bi se ponosio svaki proizvođač pa tako i Vestas jest V236-15.0 MW. Predstavlja rezultat dokazane, svjetske tehnologije namijenjen za primjenu na pučinama u svim dijelovima svijeta. S najvećom površinom rotacije rotora i faktorom iskorištenja snage od preko 60% ovaj vjetroagregat donosi prevagu u proizvodnji električne energije. Ne samo da je ogromne snage nego se radilo i na njegovoj izdržljivosti i sigurnosti te se njegov životni vijek procjenjuje na 25 godina pa i više ovisno o uvjetima. [17]

Tablica 5.2. Tehničke specifikacije V236-15.0 MW [17]

|                                   |   |
|-----------------------------------|---|
| Regulacija snage                  | Regulacija nagibom s promjenjivom brzinom |
| Nazivna snaga                     | 15 000kW                                  |
| Brzina uključanja                 | 3 m/s                                     |
| Brzina isključenja                | 30 m/s                                    |
| Klasa vjetra                      | IEC S ili S,T                             |
| Raspon temperature                | -10°C do 45°C                             |
| Maksimalna jačina buke            | 118 dB(A)                                 |
| Promjer rotora                    | 236 m                                     |
| Duljina lopatica                  | 115.5 m                                   |
| Površina kruga nastala rotiranjem | 43 742 m <sup>2</sup>                     |
| Gustoća snage                     | 342.9 W/ m <sup>2</sup>                   |
| Frekvencija                       | 50/60 Hz                                  |
| Pretvarač energetske elektronike  | Nazivne snage                             |
| Prijenosnik snage (brzine)        | Planetarni                                |
| Visina glavčine                   | Ovisno o mjestu                           |
| Mjesto instalacije                | Pučina                                    |



Sl. 5.5. Godišnja proizvodnja električne energije V236 vjetroagregata u ovisnosti o brzini vjetra [17]

#### 5.4.2. GE Renewable Energy

Cypress platforma sadrži vjetroagregate namijenjene za kopno čiji su rotori promjera 158 i 164 metara, raznih snaga od 4.8 do 6.1 MW. Duže lopatice pridonose smanjenju *LCOE*. Prednost Cypress platforme je što se značajno smanjuju troškovi logistike jer se omogućuje sastavljanje lopatica na konačnoj lokaciji i smanjuju se troškovi transporta. Vrhovi lopatica su takvi da omogućuju kupcima veću fleksibilnost uporabe u raznim uvjetima odnosno za iskorištenje različitih vjetrova. Visokotehnološke karbonske lopatice su razvijane duži period kroz dugogodišnje partnerstvo niza GE podružnica kako bi se plan sproveo od koncepta do gotovog proizvoda. [18]



Sl. 5.6. Prototip Cypress vjetroagregata [18]

Tablica 5.3. Tehničke specifikacije vjetroagregata Cypress platforme . [18]

| Cypress platforma                 | 4.8-158                      | 5.3-158                      | 5.5-158                      | 6.0-164               |
|-----------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------|
| Nazivna snaga                     | 4 800 kW                     | 5 300 kW                     | 5 500 kW                     | 6 000 kW              |
| Brzina uključenja                 | 3 m/s                        | 3 m/s                        | 3 m/s                        | 3 m/s                 |
| Klasa vjetra                      | S                            | S                            | S                            | S                     |
| Promjer rotora                    | 158 m                        | 158 m                        | 158 m                        | 164 m                 |
| Površina kruga nastala rotiranjem | 19 607 m <sup>2</sup>        | 19 607 m <sup>2</sup>        | 19 607 m <sup>2</sup>        | 21 124 m <sup>2</sup> |
| Gustoća snage                     | 244.9 W/ m <sup>2</sup>      | 270.3 W/ m <sup>2</sup>      | 280.5 W/ m <sup>2</sup>      | 284 W/ m <sup>2</sup> |
| Frekvencija                       | 50/60 Hz                     | 50/60 Hz                     | 50/60 Hz                     | 50/60 Hz              |
| Prijenosnik snage (brzine)        |                              | Planetarni / helični         | Planetarni / helični         | Planetarni / helični  |
| Mjesto instalacije                | Kopno                        | Kopno                        | Kopno                        | Kopno                 |
| Visina glavčine                   | 101 m / 121 m / 151 m / 161m | 101 m / 121 m / 151 m / 161m | 101 m / 121 m / 151 m / 161m | 112 m / 167 m         |

Što se tiče vjetroagregata namijenjenih za pučinu, GE se iskazao predstavljanjem Haliade-X vjetroagregatima. Promjer rotora ovih jedinica iznosi 220 metara a snaga je 12, 13 ili 14 MW. Ono što krasi niz vjetroagregata novog doba jest veliki faktor iskorištenja koji ide čak do 64%. Kombinacija većeg rotora, dužih lopatica i većeg faktora iskorištenja dovodi do toga da su vjetroagregati Haliade-X generacije manje osjetljivi na promjene vjetra i generiraju dosta električne energije i pri malim brzinama. Jedan Haliade-X 14 MW vjetroagregat može proizvesti čak do 74 GWh bruto godišnje energije. [18]



Sl. 5.7. Haliade-X vjetroagregat [18]



Tablica 5.4. Tehničke specifikacije Haliade-X vjetroagregata [18]

| Haliade X                         | 12 MW                   | 13 MW                   | 14 MW                   |
|-----------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Nazivna snaga                     | 12 000 kW               | 13 000 kW               | 14 000 kW               |
| Klasa vjetra                      | Ib                      | IC                      | IC                      |
| Promjer rotora                    | 220 m                   | 220 m                   | 220 m                   |
| Duljina lopatica                  | 107 m                   | 107 m                   | 107 m                   |
| Površina kruga nastala rotiranjem | 38 000 m <sup>2</sup>   | 38 000 m <sup>2</sup>   | 38 000 m <sup>2</sup>   |
| Gustoća snage                     | 315.8 W/ m <sup>2</sup> | 342.1 W/ m <sup>2</sup> | 368.4 W/ m <sup>2</sup> |
| Frekvencija                       | 50/60 Hz                | 50/60 Hz                | 50/60 Hz                |
| Faktor iskorištenja               | 63 %                    | 60-64 %                 | 60-64 %                 |
| Bruto GPE                         | 68 GWh                  | 71 GWh                  | 74 GWh                  |
| Prijenosnik snage (brzine)        | Direktni pogon          | Direktni pogon          | Direktni pogon          |
| Mjesto instalacije                | Pučina                  | Pučina                  | Pučina                  |
| Ukupna visina                     | 248 m                   | 248 m                   | 248 m                   |
| Visina glavčine                   | 150 m                   | 133 m / 150 m           | 150 m                   |

### 5.4.3. Goldwind

Goldwind se u 2020. godini našao na trećem mjestu proizvođača i ostvario značajan instalirani kapacitet. Zadnji primjerak kojim se ponose je GW175-8.0 MW vjetroagregat. [19]

Tablica 5.5. Tehničke specifikacije GW175-8.0 MW [19]

|                                   |                         |
|-----------------------------------|-------------------------|
| Nazivna snaga                     | 8 000 kW                |
| Frekvencija                       | 50/60 Hz                |
| Brzina uključenja                 | 3 m/s                   |
| Optimalna brzina vjetra           | 12 m/s                  |
| Brzina isključenja                | 25 m/s                  |
| Promjer rotora                    | 175 m                   |
| Površina kruga nastala rotiranjem | 24 053 m <sup>2</sup>   |
| Gustoća snage                     | 332.6 W/ m <sup>2</sup> |
| Prijenosnik snage (brzine)        | Direktni pogon          |
| Visina glavčine                   | 110 m                   |
| Klasa vjetra                      | IEC S                   |
| Radna temperatura                 | -10°C do 40°C           |
| Izdržljiva temperatura            | -20°C do 50°C           |
| Procijenjeno vrijeme trajanja     | 25 godina               |
| Mjesto instalacije                | Kopno/Pučina            |



Sl. 5.8. Goldwind vjetroagregat [19]

#### 5.4.4. Envision

Envisionov 148-4.5 MW je njihov najveći vjetroagregat dan danas. Dizajniran je tako da omogućuje veće iskorištenje vjetra za optimalnu proizvodnju električne energije a najveću primjenu ima na mjestima gdje vlada vjetar nižih i srednjih brzina. Envision je jedna od najvećih globalnih tvrtki vezanih za vjetroagregate a u Kini imaju najveći udio na tržištu vjetroagregata za manje brzine vjetrova. Prvi, 140 metara visok vjetroagregat namijenjen nižim brzinama kojeg je osmislio i dizajnirao Envision instaliran je 2017. godine u Lankau. Time započinje nova generacija Envision vjetroagregata. [20]

Tablica 5.6. Tehničke specifikacije Envision 148-4.5 MW vjetroagregata [20]

|                                   |  |
|-----------------------------------|--|
| Nazivna snaga                     | 4 500 kW                               |
| Frekvencija                       | 50/60 Hz                               |
| Brzina uključenja                 | 3 m/s                                  |
| Brzina isključenja                | 25 m/s                                 |
| Duljina lopatica                  | 72.5 m                                 |
| Promjer rotora                    | 148 m                                  |
| Površina kruga nastala rotiranjem | 17 087 m <sup>2</sup>                  |
| Gustoća snage                     | 263.4 W/ m <sup>2</sup>                |
| Prijenosnik snage (brzine)        | dva planetarna stupnja / jedan helični |
| Visina glavčine                   | 106 m / 126 m                          |
| Klasa vjetra                      | S                                      |
| Mjesto instalacije                | Kopno/Pučina                           |



Sl. 5.9. Envision vjetroagregat [20]

#### 5.4.5. Siemens Gamesa

Nova Siemens Gamesa 5.X platforma vezana za vjetroagregate na kopnu predstavlja najsuvremeniju tehnologiju usavršenu u prostorijama ove tvrtke. Ovom platformom povezuju se dokazane tehnologije, minimizira se rizik i garantira se pouzdanost u nova dva tipa vjetroagregata a to su SG 6.6-155 i SG 6.6-170. Oni predstavljaju kombinaciju dvostruko napajanih generatora, kompaktnih pogonskih sklopova i mjenjača sa tri stepena te koristi ostale komponente iz drugih Siemens Gamesa platformi koje su već dokazane. Zbog toga ovi najsuvremeniji vjetroagregati daju odlične rezultate rada. Koriste rotore s jednim od najvećih promjera na tržištu i pogodni su za rad na praktički svakoj brzini vjetra. [21]

Tablica 5.7. Tehničke specifikacije SG 6.6-170 vjetroagregata [21]

|                                   |                                 |
|-----------------------------------|---------------------------------|
| Nazivna snaga                     | 6 600 kW                        |
| Frekvencija                       | 50/60 Hz                        |
| Promjer rotora                    | 170 m                           |
| Gustoća snage                     | 290.4 W/ m <sup>2</sup>         |
| Regulacija brzine lopatica        | Zakretom i promjenjivom brzinom |
| Površina kruga nastala rotiranjem | 22 697 m <sup>2</sup>           |
| Brzina vjetra                     | Niska / srednja / visoka        |
| Visina glavčine                   | 100 m / 115 m / 135 m / 165 m   |
| Mjesto instalacije                | Kopno                           |
| Prvi prototip                     | 2021.                           |



Sl. 5.10. Siemens Gamesa vjetroagregat [21]

Što se tiče vjetroagregata namijenjenih postavljanju na pučinu, Siemens Gamesa predstavila je SG 14-222 DD. Promjer rotora iznosi nevjerojatna 222 metra a duljina pojedine lopatice je 108 metara. Inženjeri su zaključili da ovakav tip vjetroagregata donosi i do 25 % više proizvedene energije na godišnjoj razini u odnosu na njene prethodnike u istim uvjetima. Ovakvim proizvodom Siemens Gamesa je svijetu dala jasnu poruku da oni nastoje dovesti industriju uporabe pučinskog vjetra do te granice da ovakva proizvodnja električne energije bude neosporiv svjetski izbor. U tablici 4.5. dani su neki od parametara ovog jedinstvenog primjerka. [21]

Tablica 5.8. Tehničke specifikacije SG 14-222 DD vjetroagregata . [21]

|                                   |                             |
|-----------------------------------|-----------------------------|
| Nazivna snaga                     | 14 000 kW                   |
| Promjer rotora                    | 222 m                       |
| Duljina lopatica                  | 108 m                       |
| Površina kruga nastala rotiranjem | 39 000 m <sup>2</sup>       |
| Snaga po površini                 | 359 W/ m <sup>2</sup>       |
| Klasa vjetra                      | I, S                        |
| Prijenosnik snage (brzine)        | Direktni pogon              |
| Visina glavčine                   | Ovisno o mjestu             |
| Mjesto instalacije                | Pučina                      |
| Regulacija brzine lopatica        | Zakret i promjenjiva brzina |
| Serijska proizvodnja              | 2024.                       |

### 5.4.6. Mingyang

Mingyang je 2021. godine objavio projekt pučinskog vjetroagregata koji je stavio u sjenu svaki drugi. Riječ je o MySE 16.0-242 modelu čiji bi prototip trebao biti instaliran 2023. godine a serijska proizvodnja početi naredne, 2024. godine. Rotor promjera čak 242 metra sastavljen je od lopatica dugih 118 metara koje rotiranjem zahvaćaju površinu od čak 46 000 m<sup>2</sup>. Nazivne snage od 16 MW ovaj vjetroagregat ne samo da je najveći ove vrstke, nego je to svjetski najveći proizvod takvog tipa. Procjenjuje se da se na godišnjoj razini može proizvesti oko 80 GWh električne energije, što je dovoljno za napajanje više od 20 000 kućanstava. Kako su iz Mingyang-a rekli, novi model proizvodi čak 45% više energije od prethodnog MySE 11.0-203. Ovim projektom Mingyang je stavio naglasak na svoju novu pučinsku 15+ MW platformu. Planira se dizajniranje i izgradnja raznih varijanti vjetroagregata koji su sposobni za adaptaciju različitim uvjetima na pučini, sve od mora koja su sklona udaranju tsunamija pa do morskih površina na kojim stalno udara jak vjetar. [22]

Tablica 5.9. Tehničke specifikacije MySE 16.0-242 vjetroagregata [22]

|                                   |                        |
|-----------------------------------|------------------------|
| Nazivna snaga                     | 16 000 kW              |
| Promjer rotora                    | 242 m                  |
| Duljina lopatica                  | 118 m                  |
| Površina kruga nastala rotiranjem | 46 000 m <sup>2</sup>  |
| Snaga po površini                 | 347.8 W/m <sup>2</sup> |
| Prijenosnik snage (brzine)        | Hibridni pogon         |
| Klasa vjetra                      | Ib, T                  |
| Visina glavčine                   | Ovisno o mjestu        |
| Mjesto instalacije                | Pučina                 |
| Serijska proizvodnja              | 2024.                  |



Slika 5.11. MySE 16.0-242 vjetroagregat [22]

## 5.5. Usporedba današnjih vjetroagregata

U zadnjem desetljeću došlo je do velikog napretka u iskorištavanju vjetra i industriji proizvodnje električne energije na ovakav način. U odnosu na vjetroagregate iz prošlog stoljeća, promijenile su se mnoge stvari. Najveća promjena gledano okom jest što su današnje jedinice dosta veće od svojih prethodnika i samim time omogućava se proizvodnja veće količine energije. Iako je veličina vjetroagregata danas 2 ili 3 puta veća, snaga je veća i do 10 puta. Cilj svih današnjih proizvođača koji se nalaze u vrhu jest izvući što je više moguće snage, ali uz to dolaze i robusni dijelovi pa su i vjetroagregati sve glomazniji. Može se zaključiti da je današnja tehnologija vrlo slična u svim tvrtkama ove grane industrije jer zapravo svi teže istim ciljevima. Razlike postoje ali su one minimalne. Fokus se sve više stavlja na iskorištenje vjetra s morskih površina i mnogi proizvođači su već sada objavili svoje projekte za budućnost gdje se vidi da će snaga vjetroagregata u idućih 5 godina biti i preko 20 MW. [16]

Proizvođači se svim silama trude ući u najbolje društvo ali isto tako nastoje se i zadržati jer kao i svako drugo tržište i tržište energijom vjetra donosi velike zarade. Kroz primjere navedene u radu dolazi se do zaključka da agregat najvećih snaga iznosa 14, 15 pa i 16 MW godišnje proizvode 60 do 80 GWh energije. Tehnologijom se omogućilo postizanje velikog faktora iskorištenja snage koji je danas čak i preko 60 % na većini top modela raznih proizvođača. Razvojem novih materijala i primjenom modernih tehnologija vjetroagregati postaju sve moćniji i moćniji i time se postiže efekt da se kroz niz godina sve više električne energije dobiva iz vjetroelektrana. U tablici 5.10. prikazana je usporedba osnovnih tehničkih podataka najmodernijih vjetroagregata.

Tablica 5.10. Usporedba raspoloživih tehničkih podataka najmodernijih vjetroagregata

| Proizvođač          | Kopno  | Pučina  |
|---------------------|--|---|
| Vestas              | V162-6.2 MW<br>Brzina uklj./isklj. : 3 / 25 m/s<br>Promjer rotora: 162 m<br>Površina rotiranja: 20 612 m <sup>2</sup><br>Gustoća snage: 300 W/m <sup>2</sup> | V236-15 MW<br>Brzina uklj./isklj. : 3 / 30 m/s<br>Promjer rotora: 236 m<br>Površina rotiranja: 43 742 m <sup>2</sup><br>Gustoća snage: 342.9 W/m <sup>2</sup> |
| GE Renewable Energy | GW 175 - 8 MW<br>Brzina uklj./isklj. : 3 / 25 m/s<br>Promjer rotora: 175 m<br>Površina rotiranja: 24 053 m <sup>2</sup>                                      |   |

|                       |   |  |
|-----------------------|---|--|
|                       | Gustoća snage: 332.6 W/m <sup>2</sup>   |  |
| Envision              | E 148 – 4.5 MW<br>Brzina uklj./isklj. : 3 / 25 m/s<br>Promjer rotora: 148 m<br>Površina rotiranja: 17 087 m <sup>2</sup><br>Gustoća snage: 263.4 W/m <sup>2</sup> |  |
| Siemens Gamesa        | SG 6.6 – 170 6.6 MW<br>Promjer rotora: 170 m<br>Površina rotiranja: 22 697 m <sup>2</sup><br>Gustoća snage: 290.8 W/m <sup>2</sup>                                | SG 14 – 222 DD 14 MW<br>Promjer rotora: 222 m<br>Površina rotiranja: 39 000 m <sup>2</sup><br>Gustoća snage: 359 W/m <sup>2</sup>  |
| Mingyang Smart Energy | MySE 11 – 203 11 MW<br>Promjer rotora: 203 m<br>Površina rotiranja: 32 365 m <sup>2</sup><br>Gustoća snage: 339.9 W/m <sup>2</sup>                                | MySE 16 – 242 16 MW<br>Promjer rotora: 242 m<br>Površina rotiranja: 46 000 m <sup>2</sup><br>Gustoća snage: 347.8 W/m <sup>2</sup> |

## 5.6. Mali vjetroagregati na trenutnom tržištu

Malim vjetroagregatima se smatraju oni koji proizvode dovoljno električne energije za jedno kućanstvo, farmu ili malo poduzeće. Neke institucije uvažavaju da je najveća snaga do kojih se vjetroagregat smatra malim 50 kW a druge pak granicu podižu na 100 kW. Kako god bilo, oni se koriste za raznovrsne primjene na kopnu, ali i na pučini. Neki osnovni primjeri jesu pumpanje ili desalinizacija vode, punjenje baterija, elektrifikacija seoskih područja i slično. [16] Godišnje globalno tržište nastavilo se smanjivati u 2019. godini kao odgovor na nedosljednu podršku politike u obliku uvođenja tržišnih ograničenja i uklanjanja poticaja. Također još jedan bitan razlog je konkurencija relativno jeftinih solarnih panela. Tijekom 2019. godine u šest država prema procjenama instalirana je ukupna snaga od 42.5 MW novih malih vjetroagregata. To je smanjenje u odnosu na 2018. (47 MW) i 2017. (114 MW) godinu. Otprilike je na kraju te iste 2019. godine ukupna instalirana snaga malih vjetroagregata na globalnoj razini iznosila 1.7 GW a činilo ju je više od milijun primjeraka.

Kina je ostala najveće tržište sa 23 MW novih instalacija. Bitno je još navesti Japan (17 MW), SAD (1.4 MW), Njemačku (0.5 MW), Ujedinjeno Kraljevstvo (0.4 MW) i Dansku (0.2 MW). [16] Kao odgovor na sužavanje domaćeg tržišta zadnjih godina, broj proizvođača malih vjetroagregata u Kini i SAD-u je znatno opao. Mnogi od njih su se okrenuli izvoznim tržištima koja su također u

padu. Izvozi američke proizvodnje, na primjer, pali su ispod 0.5 MW u 2019., u odnosu na 2015. (21.4 MW) jer su ključna izvozna tržišta uvelike presušila zbog smanjenja ili obustavljanja *feed-in* tarifnih programa. U SAD-u je krajem 2019. i početkom 2020. stanje krenulo nabolje zbog raznih promjena u sustavu i boljeg financiranja radi stjecanja konkurentnosti malih vjetroagregata. I u Italiji se zbog raznih poticaja i ulaganja trećih strana stanje popravilo jer je u prvoj polovici 2020. godine postavljeno čak 8 MW novih kapaciteta. To je ogroman napredak jer je novoinstalirana snaga za cijelu 2019. godinu iznosila samo 2.6 MW. U drugim krajevima dolazi do razvoja novih tvrtki, uključujući Diffuse Energy (Australija) i Alpha 311 Ltd. (Ujedinjeno Kraljevstvo). Neke nove primjene za male vjetroagregate koje su u stanju razmatranja pa čak i razvijanja uključuju rudarstvo, mikro mreže i podatkovne centre. [16]



Slika 5.12. Hyland 920 mali vjetroagregat [23]

Na slici 5.12. prikazan je Hyland 920. Ovaj mali vjetroagregat tvrtke Diffuse Energy nazivne snage 220 W, promjera svega 920 mm, godišnje može proizvesti i do 450 kWh energije na brzini vjetra od oko 4.5 m/s. Teži svega nešto više od 18 kilograma. [23]



Slika 5.13. Alpha 311 Mk.X vjetroagregat [24]



Manja veličina i težina te unikatni dizajn bez osovine omogućava postavljanje Alpha 311 vjetroagregata bilo gdje. Najučinkovitiji je kada je postavljen u blizini ceste ili željeznice jer tada koristi strujanje zraka nastalo vozilima u prolazu te se proizvodi električna energija i kad ne puše vjetar. Time se omogućava lokalna proizvodnja energije i samim time nema potrebe za troškovima prijenosa, što pogoduje krajnjim korisnicima. [24]

Još neki primjeri proizvođača malih vjetroagregata unazad kroz godine prikazani su dalje u radu. Excel 10 je vjetroagregat tvrtke Bergey Windpower. Ima horizontalnu os vrtnje, a dolazi u izvedbi od 1, 6, 7.5 ili 10 kW. Zbog velike pouzdanosti, jednostavnog dizajna i dugog vijeka trajanja ovaj agregat pokazao se jednim od najboljih na tržištu. [25]



Slika 5.14. Excel 10 vjetroagregat [25]

City Windmills ima namjeru postati svjetski lider u proizvodnji malih vjetroturbina za tvornice, zgrade i domaćinstva. Umjesto horizontalne, njihovi proizvodi koriste vertikalnu os vrtnje i dolaze u izvedbama snage 0.5, 1 i 2 kW. [25]



Slika 5.15. City Windmills vjetroagregat [26]

Još jedan proizvođač vjetroturbina s vertikalnom osi vrtnje je Envergate. Dolaze sa nešto jačim nazivnim snagama iznosa 20 ili 100 kW. Prednosti su visoka učinkovitost, mali troškovi investiranja i odlična kvaliteta. Vertikalni rotor omogućuje hvatanje vjetra iz svih smjerova. [25]



Slika 5.16. Envergate vjetroagregat [25]

Eocycle Technologies razvija, proizvodi i komercijalizira diljem svijeta EOCYCLE 25, najmoderniju vjetroturbinu s direktnim pogonom od 25 kW. Koristeći više od 12 godina internog istraživanja i razvoja te izrade prototipova, Eocycle Technologies ističe se od svojih konkurenata integriranom tehnološkom i proizvodnom tvrtkom. Ovaj proizvođač ima sva intelektualna vlasništva i komercijalna prava za svaku ključnu komponentu svoje vjetroturbine. [25]



Slika 5.17. Eocycle vjetroagregat [25]

Ghrepower je vodeći proizvođač vjetroturbina specijaliziran za istraživanje i razvoj te proizvodnju u Kini. Imaju integriranu uslugu projektiranja, proizvodnje, instalacije, puštanja u rad, prodaje i održavanja nakon prodaje. Proizvode se vjetroagregati snage 0.3, 0.5, 2, 3, 5, 10, 30, 50 i 100 kW. [25]



Slika 5.18. Ghrepower vjetroagregat [25]

Superwind 350 je mali vjetrogenerator za profesionalnu uporabu, koji čak i u ekstremnim uvjetima radi autonomno i automatski. Često se koristi na stranicama gdje nema dostupne mreže. Električna energija koju proizvodi puni baterije i može se koristiti izravno za uređaje od 12V ili 24V. Idealna područja primjene, na primjer, su navigacijska pomagala, sustavi upravljanja trakom, postaje za praćenje okoliša ili odašiljači, ali i jedrilice, kamperi, ljetnikovci i planinska skloništa. [25]



Slika 5.19. Superwind vjetroagregat [25]

## 6. ODABIR OPTIMALNE VELIČINE VJETROAGREGATA NA MIKROLOKACIJI VJETROELEKTRANE OTRIĆ

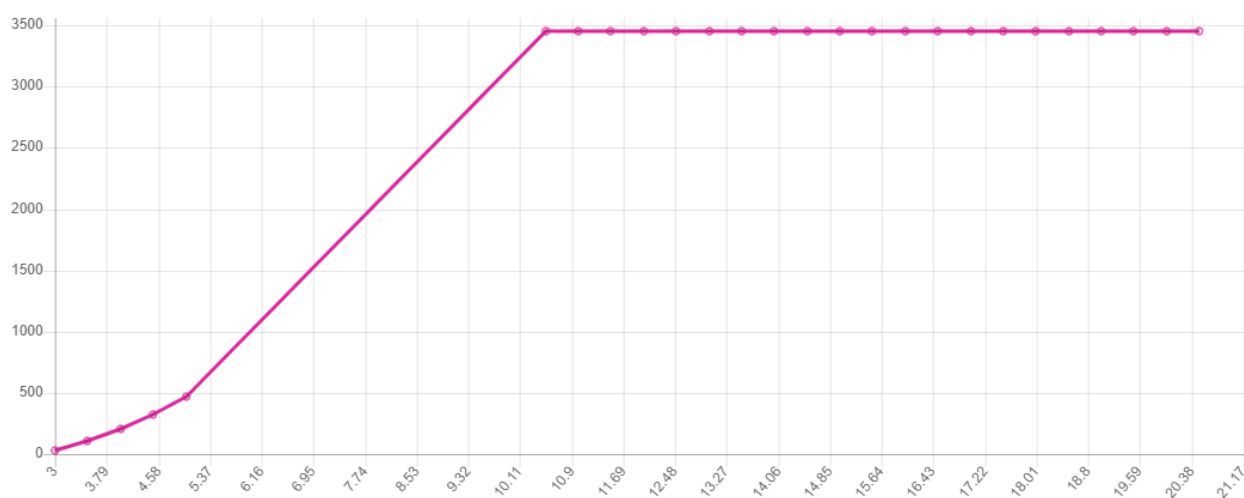
S obzirom da proizvođači imaju različite veličine vjetroagregata, u praktičnom dijelu rada dat će se odabir optimalne veličine agregata na određenoj mikrolokaciji. Kao primjer korišten je vjetar i njegova razdioba na lokaciji vjetroelektrane Otrić. [27] Za krivulje snaga vjetroagregata korišteni su raspoloživi podaci s interneta. [28] Cilj je prikazati krivulje i podatke godišnje proizvodnje električne energije različitih vjetroagregata na toj lokaciji. Odabrana su 3 vjetroagregata poznatih proizvođača sličnih snaga te jedan manje snage čisto za usporedbu.

U tablici 6.1. nalaze se brzine vjetra s pripadnim udjelima za odabrani primjer lokacije.

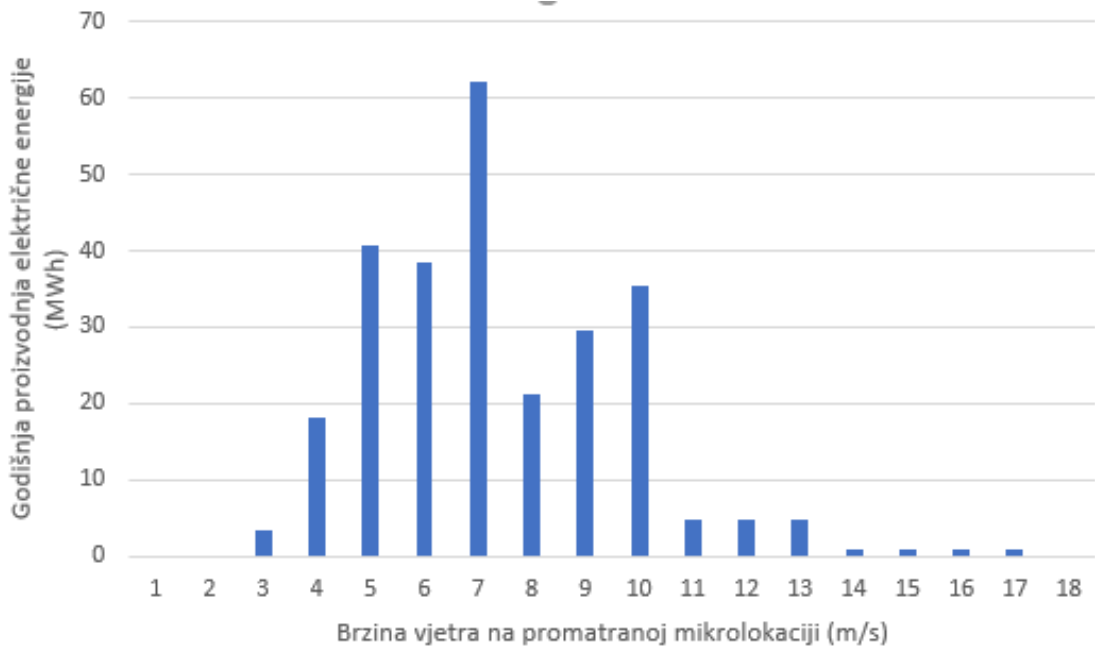
Tablica 6.1 Brzina i udio vjetra kroz godinu za odabranu mikrolokaciju VE Otrić [27]

|                 |              |              |              |              |              |               |                |                |                |
|-----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| Brzina<br>(m/s) | 0.0 –<br>0.2 | 0.3 –<br>1.5 | 1.6 –<br>3.3 | 3.4 –<br>5.4 | 5.5 –<br>7.9 | 8.0 –<br>10.7 | 10.8 –<br>13.8 | 13.9 –<br>17.1 | 17.2 –<br>20.7 |
| Godišnje<br>(%) | 13.9         | 28.1         | 20.6         | 20.6         | 12.9         | 3.3           | 0.5            | 0.1            | 0              |

Po poznatim podacima za ovu lokaciju, zaključuje se da preko 90% godišnje vjetar u prosjeku puše manjom brzinom od 8 m/s. Naravno pojavljuje se jači vjetar većih brzina ali su to uglavnom naleti a ne ustaljeno stanje. [27] U primjerima ispod pokazana je očekivana proizvodnja električne energije proizvoljno izabranih vjetroagregata u ovisnosti o vjetru.



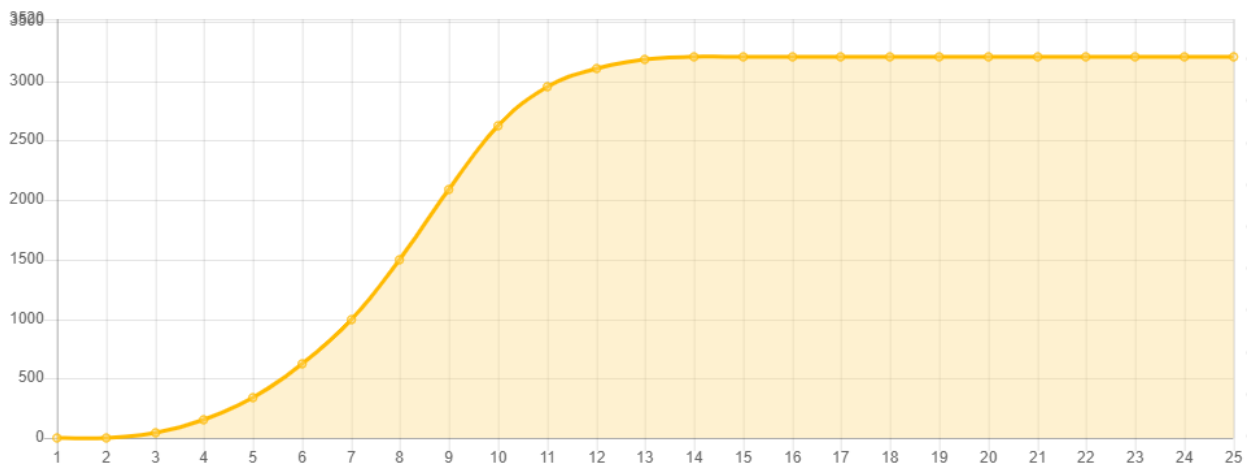
Slika 6.1. Krivulja snage Vestas V136 – 3.45 MW vjetroagregata [28]



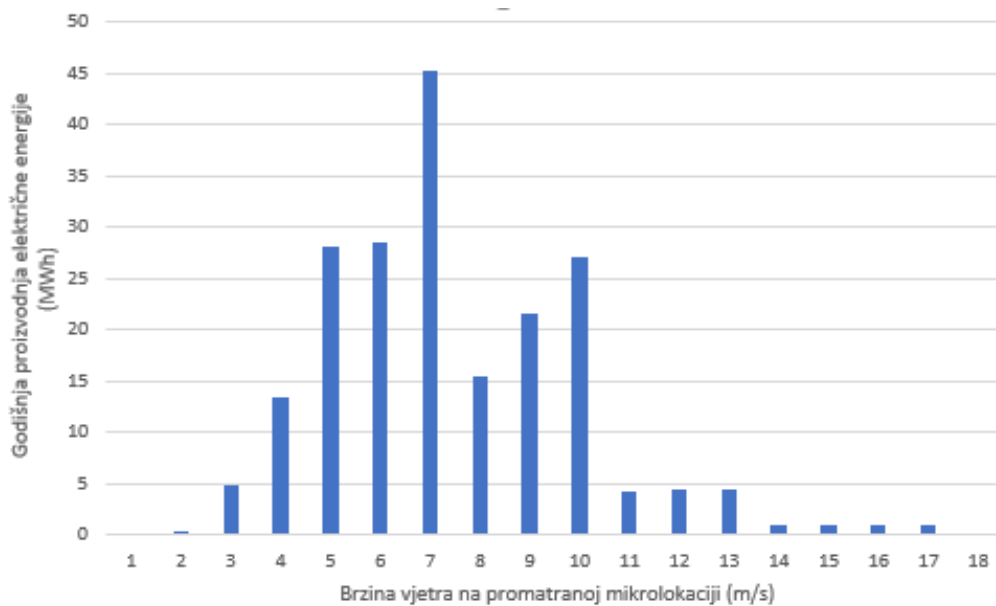
Slika 6.2. Očekivana godišnja proizvodnja električne energije Vestas V136 - 3.45 MW na odabranoj mikrolokaciji

Vestas je danas jedan od najvećih proizvođača na tržištu i za proračun je korišten njihov primjerak snage 3.45 MW, promjera lopatica 136 m koji po tehničkim parametrima ima gustoću snage od  $247 \text{ W/m}^2$ . Po krivulji snage vidi se da nazivnu snagu postiže tek na brzinama vjetra iznad 10 m/s kojih na ovoj lokaciji ipak nema dovoljno.

Kao idući primjer uzet je Enercon agregat nazivne snage 3.2 MW.

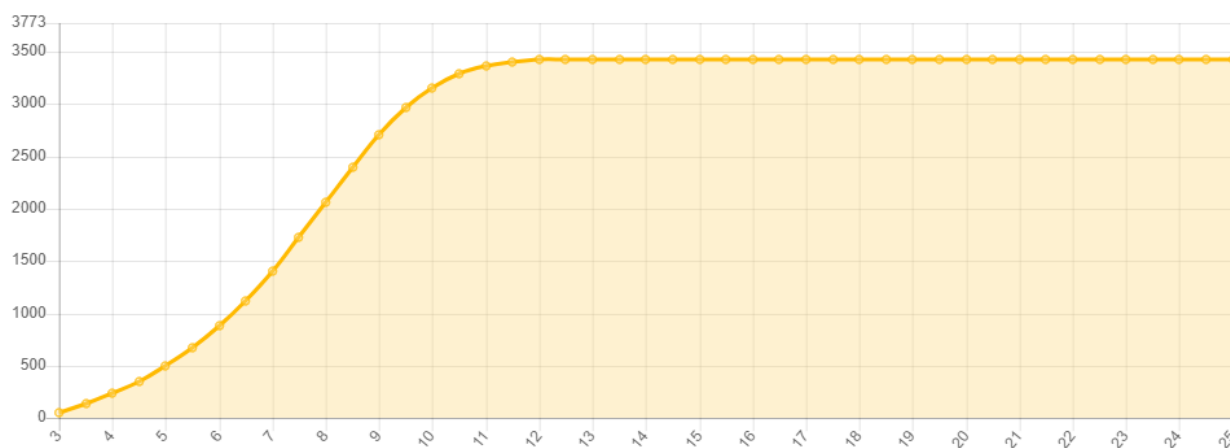


Slika 6.3. Krivulja snage Enercon E – 115 3.2 MW vjetroagregata [28]

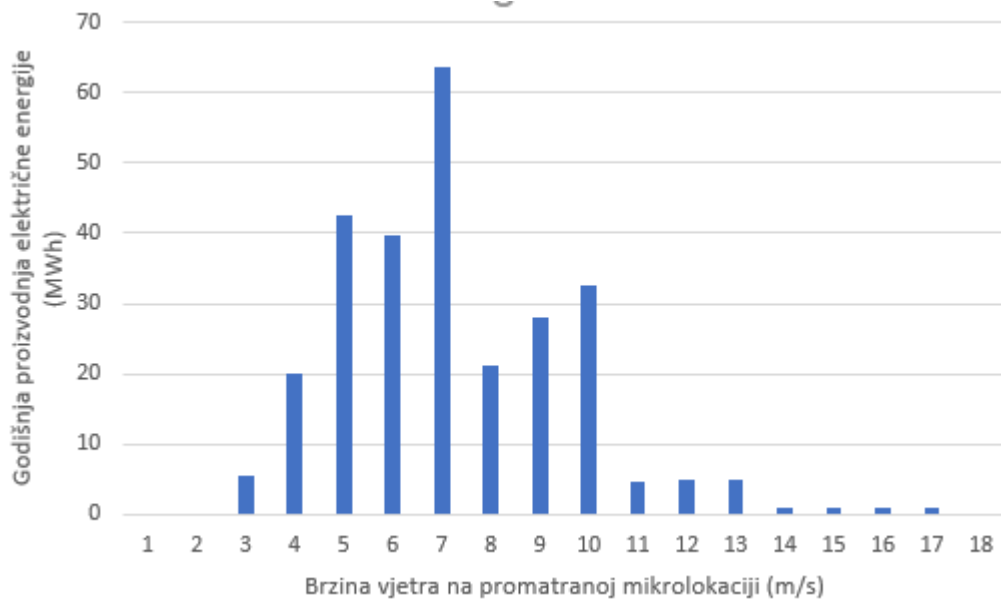


Slika 6.4. Očekivana godišnja proizvodnja električne energije Enecorn E 115 – 3.2 MW na odabranoj mikrolokaciji

Još jedan vrlo sličan primjerak je GE 137 nazivne snage 3.4 MW. Kao i prethodna dva vjetroagregata i njemu je problem nedovoljan broj sati kroz godinu u kojima puše vjetar iznad 10 m/s.

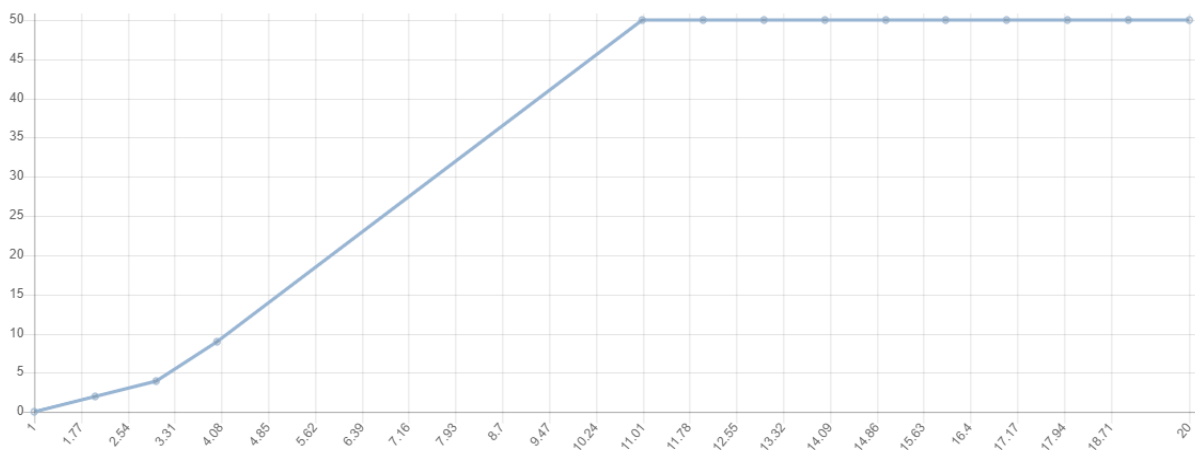


Slika 6.5. Krivulja snage General Electric GE 137 - 3.4 MW vjetroagregata [28]

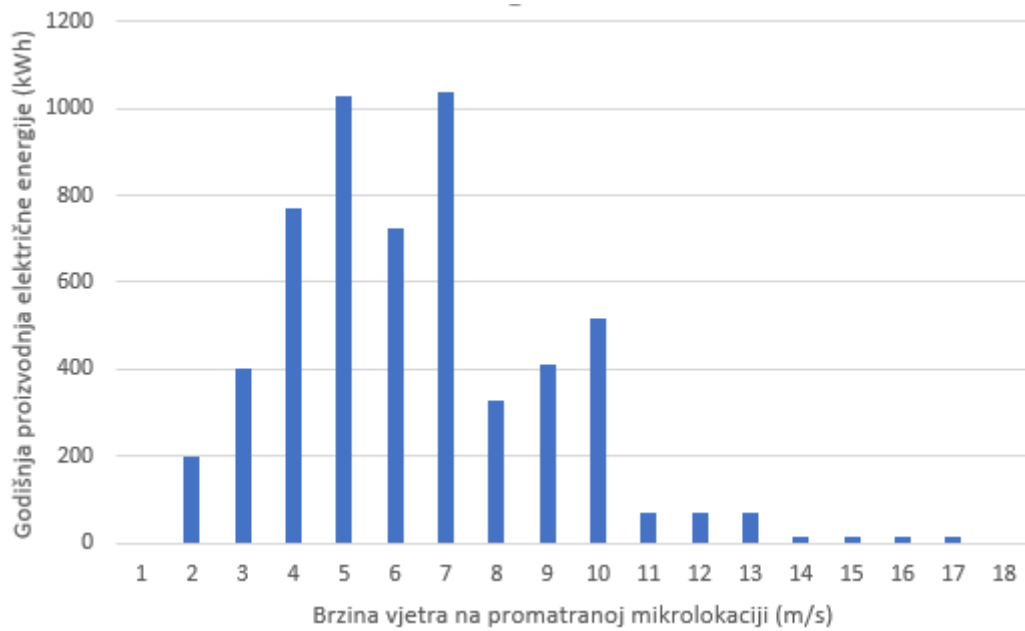


Slika 6.6. Očekivana godišnja proizvodnja električne energije General Electric GE 137 - 3.4 MW na odabranoj mikrolokaciji

Kao primjer malog vjetroagregata uzet je Hummer H17 – 50 kW.

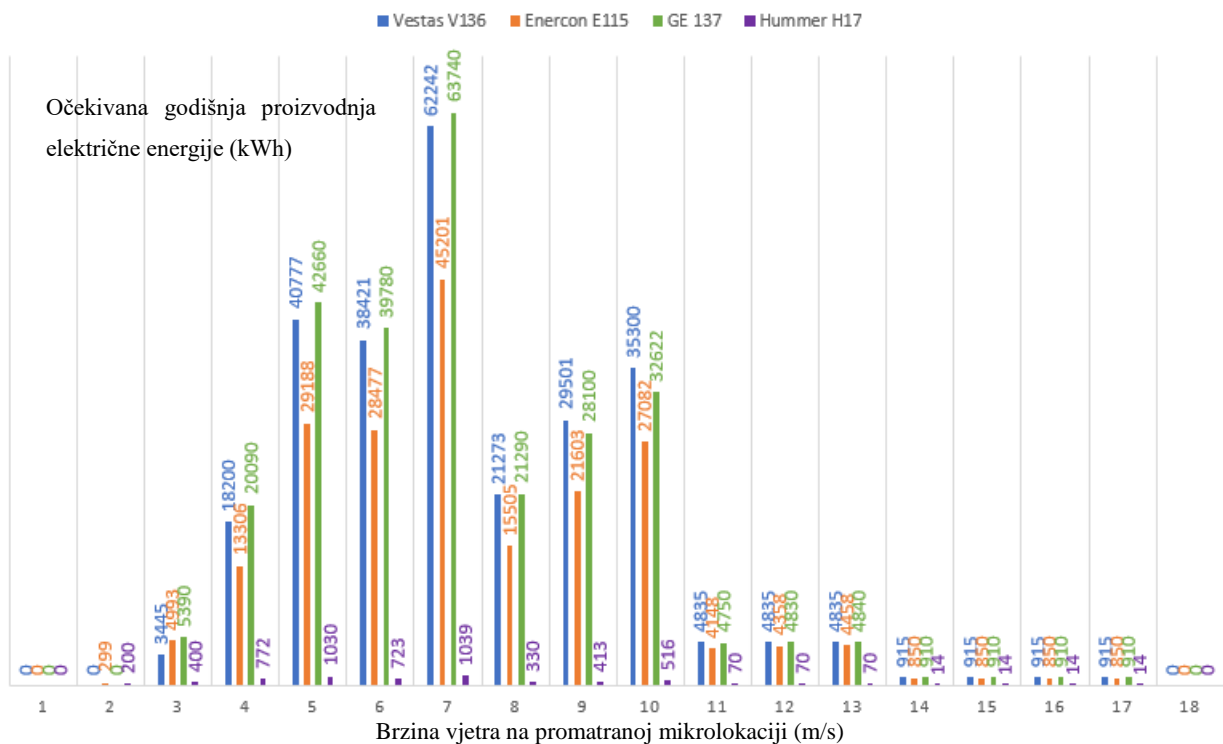


Slika 6.7. Krivulja snage Hummer H17 – 50 kW vjetroagregata [28]



Slika 6.8. Očekivana godišnja proizvodnja električne energije Hummer H17 – 50 kW na odabranoj mikrolokaciji

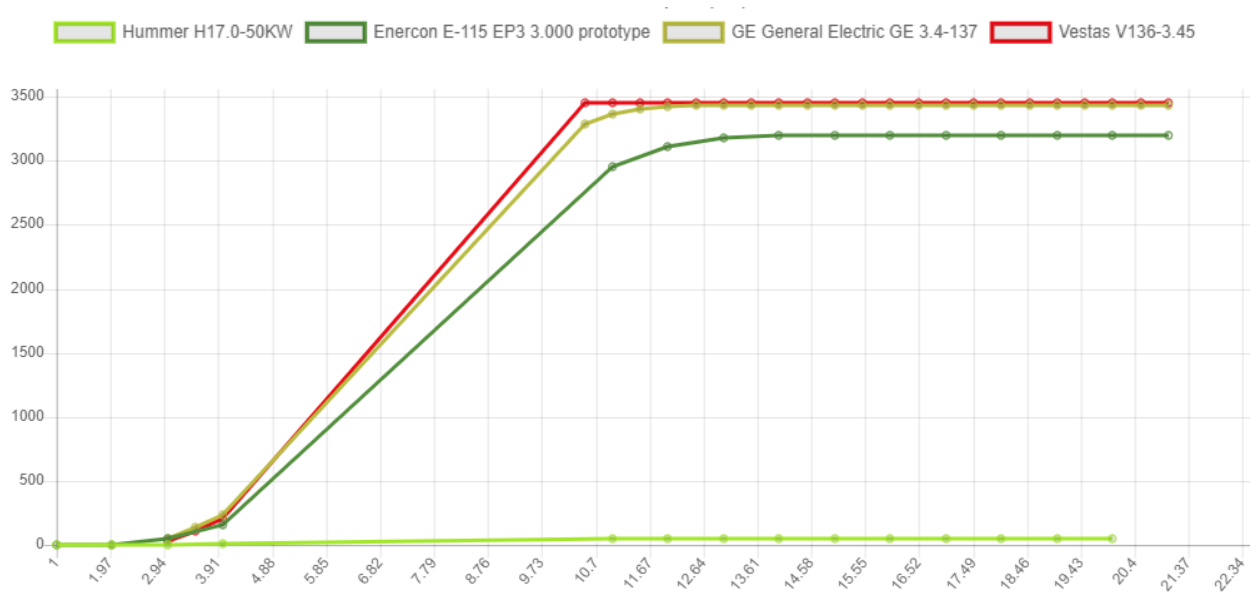
Na slici 6.9. istovremeno su prikazane očekivane godišnje proizvodnje svih vjetroagregata.



Slika 6.9. Očekivane godišnje proizvodnje svih vjetroagregata iz primjera



Krivulje imaju jako sličan oblik i uglavnom se najviše proizvodi pri brzini od 7 m/s jer je to relativno dovoljna brzina za postizanje veće snage na turbini a također od velikog značaja je što se kroz godinu na odabranoj mikrolokaciji iz primjera duži period pojavljuje vjetar baš te jačine.



Slika 6.10. Krivulje snaga svih vjetroagregata iz primjera [28]

Krivulje snaga 3 prva vjetroagregata su jako slične. Svi primjerci imaju zajednički problem na odabranoj lokaciji a to je nazivna brzina uključenja u rad koja je oko 3 m/s. Ta brzina uključenja je današnji standard, pogotovo za veće turbine reda jednog i više MW. Kao zaključak može se reći da je razlog ovakvih rezultata i krivulja očekivane proizvodnje nedovoljno kvalitetan vjetar sa stavljanjem naglaska na njegovu nisku brzinu što najviše utječe na rad vjetroagregata i njihovu proizvodnju električne energije.

## 7. ZAKLJUČAK

Još od davnina su ljudi spoznali pogodnosti korištenja vjetra kao besplatnog a vrlo dostupnog izvora energije. Napretkom tehnologije i ljudskog usavršavanja, korištenje svih obnovljivih izvora u svrhu proizvodnje električne energije postaje sve popularniji i zastupljeniji trend. Zadnjih desetak godina zbog velikog potencijala industrija pretvaranja energije vjetra u električnu energiju doživljava svoj najveći procvat. Naprava koja povezuje pojmove vjetar i električna energija jest vjetroagregat. Preteča današnjih vjetroagregata bile su vjetrenjače korištene za usitnjavanje plodova ili za pumpanje vode. Razvijanje i moderniziranje ove vrste industrije omogućilo je postavljanje i instaliranje vjetroagregata na, prije dvadesetak godina, nezamislive lokacije koje omogućavaju najbolje iskorištenje energije vjetra.

Niz više blizu smještenih vjetroagregata čini vjetroelektranu i uglavnom se danas električna energija dobiva na takav način, a relativno malo za osobne primjene. Naravno razlog tome je što korištenje vjetroagregata za osobne potrebe iziskuje ogroman novac ali i druge teško ostvarive uvjete. U ovom radu govori se općenito o energiji vjetra, iskorištavanju takve energije kroz povijest i o današnjoj suvremenoj tehnologiji koja se primjenjuje u najvećim firmama na tržištu energije vjetra. Gledajući stanje zaključno s prošlom cjelovitom 2020. godinom u svijetu je instalirano oko 743 GW kapaciteta vjetroelektrana a ta godina bila je rekordna s oko 93 GW novoinstaliranog kapaciteta. Ovakvi podaci su jasan dokaz u kojem smjeru ide ova industrija te da se globalno države sve više odriču tradicionalnih termoelektrana na fosilna goriva i svoje resurse ulažu u obnovljive izvore. Svake godine je sve više i više novih vjetroelektrana. Kroz rad su spomenuti najbolji modeli vladara na tržištu energijom vjetra u 2020. godini.

Usporedbom tehničkih specifikacija, izgledom i načinom primjene, zaključuje se da ne postoje ogromne razlike koje mogu pokazati da je jedan vjetroagregat značajno bolji od drugih. Dakako da postoje razlike u snazi, veličini i ostalim parametrima, ali zbog toga postoji i razlika u novcu, potrebnoj opremi, troškovima transporta i sve što sljeduje jer je odnos proporcionalan. Vjetroagregati postaju veći i cilj proizvođača je ostvariti što veću nazivnu snagu. Zbog toga se danas na tržištu mogu naći rotori s lopaticama čiji je promjer veći od 240 metara. Zadnjih godina sve se više koristi snaga vjetra na morskim površinama jer se zbog terena i nesmetanosti strujanja zraka postižu velike brzine i male oscilacije. Zbog toga se najveći proizvođači sve više fokusiraju na primjenu na pučinama a iako zvuči čudno i nekada nezamislivo, kopno se stavlja u drugi plan. U odnosu na tvrdo tlo, trenutno se na vodi se postavljaju vjetroagregati čak duplo veće snage, reda 15 MW.

U praktičnom dijelu je odrađen proračun koji govori kako bi se različiti vjetroagregati ponašali na odabranoj lokaciji. Naravno najveći utjecaj ima vjetar, a zbog toga što je na promatranoj lokaciji brzina uglavnom nepovoljna odnosno mala, rezultati nisu previše zavidni. Kao primjer uzeli su se vjetroagregati sličnih snaga, otprilike raspona 3 do 3.5 MW. Općenito globalni cilj je smanjiti upotrebu fosilnih goriva a time i zagađenje okoliša, gdje obnovljivi izvori, a posebice korištenje vjetra kao izvora energije značajno utječe na ostvarivanje istih.

## LITERATURA

- [1] P.Mutschler, R.Hoffman , Comparison of Wind Turbines Regarding their Energy generation, dostupno na: [https://www.lea.tu-darmstadt.de/media/srt/medien/forschung\\_5/Abstract\\_PESC\\_02\\_Mu\\_Ho\\_WWW.pdf](https://www.lea.tu-darmstadt.de/media/srt/medien/forschung_5/Abstract_PESC_02_Mu_Ho_WWW.pdf) [01.07.2021.]
- [2] M. M. Saad, N. Asmuin, Comparison of Horizontal Axis Wind Turbines and Vertical Axis Wind Turbines, IOSR Journal of Engineering, br. 08, sv. 04, str. 27-30, Kolovoz 2014., dostupno na: [https://www.researchgate.net/profile/Magedi-Saad/publication/284395706\\_Comparison\\_of\\_Horizontal\\_Axis\\_Wind\\_Turbines\\_and\\_Vertical\\_Axis\\_Wind\\_Turbines/links/57c02aec08aeb95224d1bfc7/Comparison-of-Horizontal-Axis-Wind-Turbines-and-Vertical-Axis-Wind-Turbines.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Magedi-Saad/publication/284395706_Comparison_of_Horizontal_Axis_Wind_Turbines_and_Vertical_Axis_Wind_Turbines/links/57c02aec08aeb95224d1bfc7/Comparison-of-Horizontal-Axis-Wind-Turbines-and-Vertical-Axis-Wind-Turbines.pdf) [01.07.2021.]
- [3] S. M. Salih, M. Q. Taha, M. K. Alawsaj, Performance analysis of wind turbine systems under different parameters effect, International Journal of Energy and Environment, br.6, sv.3, str. 895-904, Lipanj 2012., dostupno na: [https://www.researchgate.net/publication/268485737\\_Performance\\_Analysis\\_of\\_Wind\\_Turbine\\_Systems\\_under\\_Different\\_Parameters\\_Effect](https://www.researchgate.net/publication/268485737_Performance_Analysis_of_Wind_Turbine_Systems_under_Different_Parameters_Effect) [01.07.2021.]
- [4] W.Tong, Wind Power Generation and Wind Turbine Design, WIT Press, Southampton, 2010.
- [5] [https://en.wikipedia.org/wiki/Panemone\\_windmill#/media/File:Perzsa\\_malom.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/Panemone_windmill#/media/File:Perzsa_malom.svg) [03.07.2021.]
- [6] [https://www.adriaticsailor.com/vjetrovi\\_jadrana/sailing\\_croatia/11218/hr](https://www.adriaticsailor.com/vjetrovi_jadrana/sailing_croatia/11218/hr) [03.07.2021.]
- [7] <http://www.geni.org/globalenergy/library/renewable-energy-resources/world/europe/wind-europe/index.shtml> [03.07.2021.]
- [8] DHZ, Atlas vjetra, dostupno na: [https://meteo.hr/klima.php?section=klima\\_hrvatska&param=k1\\_8](https://meteo.hr/klima.php?section=klima_hrvatska&param=k1_8) [03.07.2021.]
- [9] <https://eko.zagreb.hr/energija-vjetra/84> [03.07.2021.]
- [10] D.Šljivac, D.Topić, Obnovljivi izvori električne energije, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku –FERIT Osijek, 2018.
- [11] <https://www.rechargenews.com/wind/denmarks-horns-rev-1-wind-farm-rendered-inoperative-by-fault/1-1-859985> [04.07.2021.]
- [12] <https://www.renewableenergyworld.com/storage/history-of-wind-turbines/#gref> [04.07.2021.]
- [13] [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/13/James\\_Blyth%27s\\_1891\\_windmill.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/13/James_Blyth%27s_1891_windmill.jpg) [04.07.2021.]
- [14] <https://kulturkanon.kum.dk/english/design/gedser-wind-turbine/> [04.07.2021.]
- [15] [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/7/7b/Sunset\\_at\\_Royd\\_Moor\\_Wind\\_Farm.jpg/600px-Sunset\\_at\\_Royd\\_Moor\\_Wind\\_Farm.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/7/7b/Sunset_at_Royd_Moor_Wind_Farm.jpg/600px-Sunset_at_Royd_Moor_Wind_Farm.jpg) [04.07.2021.]

- [16] [https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2021\\_Full\\_Report.pdf](https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2021_Full_Report.pdf) [01.09.2021.]
- [17] <https://www.vestas.com/> [01.09.2021.]
- [18] <https://www.ge.com/renewableenergy/wind-energy> [01.09.2021.]
- [19] <https://www.goldwind.com/en/> [01.09.2021.]
- [20] <https://www.envision-group.com/en/windturbines.html> [01.09.2021.]
- [21] <https://www.siemensgamesa.com/en-int> [01.09.2021.]
- [22] <http://www.myse.com.cn/en/cpyjs/index.aspx> [01.09.2021.]
- [23] <https://www.diffuse-energy.com/> [07.09.2021.]
- [24] <https://alpha-311.com/> [07.09.2021.]
- [25] <https://wwindea.org/wp-content/uploads/2014/10/SWWR2017-SUMMARY.pdf> [07.09.2021.]
- [26] <http://www.city-windmills.com/> [07.09.2021.]
- [27] [https://mingor.gov.hr/UserDocsImages/UPRAVA-ZA-PROCJENU-UTJECAJA-NA-OKOLIS-ODRZIVO-GOSPODARENJE-OTPADOM/Opuo/OPUO\\_2021/15\\_03\\_2021\\_Elaborat\\_VE\\_Otric.pdf](https://mingor.gov.hr/UserDocsImages/UPRAVA-ZA-PROCJENU-UTJECAJA-NA-OKOLIS-ODRZIVO-GOSPODARENJE-OTPADOM/Opuo/OPUO_2021/15_03_2021_Elaborat_VE_Otric.pdf) [09.09.2021.]
- [28] <https://en.wind-turbine-models.com/powercurves> [10.09.2021.]

## SAŽETAK

U radu je opisan način iskorištavanja energije vjetra u svrhu proizvodnje električne energije i tehnologija koji se danas nalaze na tržištu. Naprave koje omogućavaju takvu proizvodnju nazivaju se vjetroagregati. Na početku je opisan vjetar koji je primarni izvor energije. Definirano je njegovo nastajanje i čimbenici koji na njega utječu. Opisana je uporaba vjetra kao izvora energije stoljećima unazad. Spomenute su neki načini praćenja i analiziranja vjetra. Nakon toga definirane su vjetroelektrane, vjetroagregati i njihova svojstva, jednadžbe vezane za iskorištenje energije vjetra, razvoj kroz povijest i osnovne podjele. Dalje je kroz rad spomenuta današnja industrija i tehnologija, trenutno stanje vjetroelektrana u svijetu i najmoderniji primjeri najutjecajnijih proizvođača za zadnju godinu. Izvršena je usporedba raspoloživih tehničkih parametara. Kroz praktični rad zaključilo se o performansama vjetroagregata u ovisnosti o godišnjoj razdiobi brzine vjetra na odabranoj mikrolokaciji.

Ključne riječi: energija vjetra, tehnički parametri, usporedba vjetroagregat, vjetroelektrane

## **ABSTRACT**

### **Comparison of performance of different types of wind turbines**

The paper describes the way of using wind energy for the purpose of electricity production and technologies that are on the market today. The devices that enable such production are called wind turbines. The wind that is the primary source of energy is described at the beginning. Its formation and the factors that affect it are defined. The use of wind as an energy source centuries ago is described. Some ways of monitoring and analyzing wind are mentioned. After that, wind farms, wind turbines and their properties, equations related to wind energy utilization, development through history and basic divisions are defined. Further, the paper mentions today's industry and technology, the current state of wind farms in the world and the most modern examples of the most influential producers for the last year. A comparison of available technical parameters is performed. Through practical work, it was concluded about the performance of wind turbines depending on the annual distribution of wind speed at the selected microlocation. Keywords: comparison, technical parameters, wind energy , wind farm, wind turbine.

## **ŽIVOTOPIS**

Rad je napisao Tomislav Barbarić. Rođen je 26. srpnja 1999. godine. Živi s obitelji na selu u okolici Žepča. Nakon završetka osnovne škole odličnim uspjehom, odlučuje se i upisuje srednju tehničku školu u Katoličkom školskom centru, također u Žepču. Srednju školu završava 2018. godine i stekao je titulu učenika generacije. Iste godine upisuje preddiplomski sveučilišni studij elektrotehnike u Osijeku. Trenutno je u procesu završetka studija i planira nastaviti školovanje upisom na diplomski studij.