

# Usporedba energetske performansi malih vjetroagregata

---

**Glogoški, Rene**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2022**

*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:200:634971>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-08-21**

*Repository / Repozitorij:*

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



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU**

**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**

**Sveučilišni studij**

**Usporedba energetske performansi malih vjetroagregata**

**Završni rad**

**Rene Glogoški**

**Osijek, 2022.**

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

Osijek, 13.09.2022.

Odboru za završne i diplomske ispite

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

<b>Ime i prezime Pristupnika:</b>	Rene Glogoški
<b>Studij, smjer:</b>	Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika i informacijska
<b>Mat. br. Pristupnika, godina upisa:</b>	4674, 22.07.2019.
<b>OIB Pristupnika:</b>	48731684816
<b>Mentor:</b>	Prof.dr.sc. Damir Šljivac
<b>Sumentor:</b>	Dr. sc. Matej Žnidarec
<b>Sumentor iz tvrtke:</b>	
<b>Naslov završnog rada:</b>	Usporedba energetske performansi malih vjetroagregata
<b>Znanstvena grana rada:</b>	<b>Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)</b>
<b>Zadatak završnog rada:</b>	Dati teorijski pregled trenutnog razvoja tehnologija malih vjetroagregata. U praktičnom dijelu za zadanu mikrolokaciju sa pripadajućom statistikom brzina vjetra usporediti njihove energetske performanse. Molim prijavite se na teme koje želite, kriterij za odabir teme: zbroj ocjene iz OEiE i prosjeka ocjena prijavljenih na temi.
<b>Prijedlog ocjene završnog rada:</b>	Vrlo dobar (4)
<b>Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:</b>	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 2 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 2 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 2 bod/boda Razina samostalnosti: 2 razina
<b>Datum prijedloga ocjene od strane mentora:</b>	13.09.2022.
<b>Datum potvrde ocjene od strane Odbora:</b>	21.09.2022.
<b>Potvrda mentora o predaji konačne verzije rada:</b>	Mentor elektronički potpisao predaju konačne verzije.
	Datum:

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

Osijek, 22.09.2022.

**Ime i prezime studenta:**

Rene Glogoški

**Studij:**

Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija

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

4674, 22.07.2019.

**Turnitin podudaranje [%]:**

6

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Usporedba energetske performansi malih vjetroagregata**

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

i sumentora Dr. sc. Matej Žnidarec

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>2</b>
<b>2. ISTRAŽIVANJA I UNAPREĐENJA.....</b>	<b>3</b>
<b>3. VJETAR KAO TEMELJNI IZVOR ENERGIJE.....</b>	<b>5</b>
<b>3.1. Uporaba energije vjetra kroz povijest.....</b>	<b>5</b>
<b>3.2. Čimbenici koji utječu na vjetar.....</b>	<b>6</b>
3.2.1. Coriolisov učinak.....	6
3.2.2. Nejednoliko Sunčevo zagrijavanje.....	8
3.2.3. Lokalni geografski čimbenici.....	8
<b>3.3. Statistička obilježja vjetra.....</b>	<b>9</b>
<b>4. VJETROAGREGATI.....</b>	<b>13</b>
<b>4.1. Uporaba vjetroagregata kroz povijest.....</b>	<b>15</b>
<b>4.2. Opća podjela vjetroagregata.....</b>	<b>19</b>
4.2.1. Podjela vjetroagregata prema osi vrtnje.....	19
4.2.2. Podjela vjetroagregata prema izlaznoj snazi.....	21
4.2.3. Podjela vjetroagregata prema vrsti generatora.....	22
4.2.4. Podjela vjetroagregata prema brzini vrtnje rotora.....	23
4.2.5. Podjela vjetroagregata prema mjestu rada.....	24
<b>4.3. Optimalno mjesto postavljanja vjetroagregata.....</b>	<b>26</b>
<b>4.4. Aerodinamika lopatica turbine.....</b>	<b>28</b>
<b>5. USPOREDBA TRENUTNIH M. VJETROAGREGATA.....</b>	<b>30</b>
<b>5.1. Primjena malih vjetroagregata u kućanstvima.....</b>	<b>30</b>
<b>5.2. Vjetroagregati – trenutno stanje tržišta.....</b>	<b>31</b>
5.2.1. Vjetroturbine s tri lopatice.....	31
5.2.2. Vjetroturbine s pet lopatica.....	33
5.2.3. Vjetroturbine s jedanaest lopatica.....	36
5.2.4. Vjetroturbine s vertikalnom osi vrtnje.....	37
<b>5.3. Proračun očekivane proizvodnje el.energije malih vjetroagregata na različitim mikrolokacijama.....</b>	<b>39</b>
<b>6. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>46</b>
<b>LITERATURA.....</b>	<b>47</b>

<b>SAŽETAK.....</b>	<b>50</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>51</b>
<b>ŽIVOTOPIS.....</b>	<b>52</b>

## 1. UVOD

Tijekom prošlih desetljeća porasla je potreba za proizvodnjom električne energije kako u našoj zemlji,tako i u cijelom svijetu. To možemo pripisati i objasniti razvojem novih tehnologija kao i razvojem same industrije. U prošlosti,ljude su se najviše oslanjali na upotrebu konvencionalnih (neobnovljivih) izvora energije kao što su nafta,zemni plin i ugljen. No,upotreba neobnovljivih izvora energije često ostavlja teške i dugotrajne posljedice na sredinu koja nas okružuje kao i na zdravlje čovjeka,što je najbitnije. Obnovljivi (nekonvencijalni) izvori energije vrlo su dobra alternativa konvencionalnim izvorima. Otkad se pojavio strah od globalnog zatopljenja,zagađenja okoliša i narušavanja zdravlja,došlo je do povećanog zanimanja za razvoj i unapređenje iskorištavanja obnovljivih izvora kao što su vjetar,sunce,voda,biomasa i bioplin. Istraživanjem takvih izvora došlo je do primjene istih u hidroelektranama,vjetroelektranama,solarnim elektranama i sl. Čak i mala primjena postrojenja na obnovljive izvore može značajno pridonijeti ugodnijem i bezbrižnijem životu čovjeka i ostalih bića. Naravno,ne možemo postrojenja za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora u potpunosti iskoristiti. Također,ta postrojenja imaju svoje prednosti i mane,ali razvojem znanosti i tehnologije možemo postići zadovoljavajuće rezultate i ishode. Vrlo je važno postići što veći stupanj djelovanja,stoga je potrebno provesti određene pokuse i pronaće neke nove i uspješnije metode ispitivanja modernih tehnologija izrade. Bitno je imati na umu da neki izvori energije ovise o „višoj sili“,npr.vjetar nije uvijek dostupan niti dovoljno jako puše u isto doba dana kao što ni sa Sunca ne dopire uvijek ista količina svjetlosti niti ista količina zračenja. Pri projektiranju i gradnji postrojenja,moramo uzeti u obzir te faktore i informacije. Ukoliko ih ne uzmemo u obzir,ulaganje u izgradnju toga postrojenja neće biti isplativo niti korisno. Za proizvodnju električne energije iz energije vjetra koriste se vjetroagregati. Vjetar pokreće lopatice turbine,turbina okreće vratilo generatora koji proizvodi električnu energiju. Dakle,vjetroagregati pretvaraju kinetičku energiju u mehaničku koja se zatim pretvara u električnu. Ukoliko se vjetroagregati postave na međusobno bliske udaljenosti,tada se takvo postrojenje naziva vjetroelektrana. U većini slučajeva su svi vjetroagregati u postrojenju spojeni na istu mrežu. Ovakve su elektrane doprinjele smanjenju emisija CO<sub>2</sub>,čade,šumpornih i dušičnih spojeva koji,ako dođu u atmosferu,mogu izazvati pojavu kiselih kiša. Korištenjem obnovljivih izvora energije,značajno smanjujemo rizik od trovanja opasnim nuklearnim otpadom. Kao što se da naslutiti,čovječanstvo se mnogo oslanja na primjenu i iskorištavanje energije vjetra,što se vidi iz proteklih desetljeća. U ovome radu se opisuje zašto je energija vjetra,energija

budućnosti. Opisat će se njezino iskorištavanje u prošlosti i sadašnjosti i govorit će se o upotrebi energije vjetra za proizvodnju električne energije iz različitih tipova vjetroagregata i postrojenja.

### **1.1. Zadatak završnog rada**

Zadatak ovoga završnoga rada je predočiti i objasniti temeljna načela dobivanja električne energije, uz posredstvo energije vjetra, pomoću različitih izvedbi i tehnologija malih vjetroagregata. Cilj je pokazati trenutno stanje tržišta i trenutni razvoj tehnologija malih vjetroagregata. Također, potrebno je opisati kako se razvijala i napredovala tehnologija izvedbe vjetroagregata kroz povijest i koje su prednosti, odnosno mane ovog načina iskorištavanja energije vjetra, kao i samih izvedbi vjetroagregata.



## 2. ISTRAŽIVANJA I UNAPREĐENJA

Postoji više načina kako bismo mogli opisati vjetroagregate, njihovu primjenu, napredak tehnologije i njihovu usporedbu. U nastavku se mogu pročitati neke od značajnijih tema vezanih uz same vjetroagregate kao i njihove usporedbe.

Sveučilište Tun Hussein Onn Malaysia iz Malezije provelo je istraživanje o vjetroagregatima na osnovu načina izvedbe osi vrtnje, a to su vjetroagregati s vertikalnom osi vrtnje i vjetroagregati s horizontalnom osi vrtnje. Zapravo, oni su uspoređivali energetske performanse dviju vrsta vjetroagregata. Kao što je opisano kasnije u radu, najpoznatije dvije vrste vjetroagregata s vertikalnom osi vrtnje su Darrieusov tip i Savoniusov tip vjetroagregata. Ovakvi tipovi vjetroagregata imaju bolje karakteristike u vidu pristupačnosti, praktičnosti i sigurnosti. Postavljaju se u blizini tla, dakle nije potrebno imati gondolu. Mana ovakvih tipova vjetroagregata je to što su obično male snage jer pri tlu pušu vjetrovi manje jakosti nego na nekim visinama. Velika prednost ovakvih izvedbi je ta što mogu iskoristavati vjetar iz bilo kojeg smjera. Ukoliko je vjetar prejak, vjetroagregat ne smije biti u pogonu jer postoji opasnost od mogućih oštećenja na njemu samome kao i na ostaloj opremi. Tiši su, stoga postoji mogućnost od njihovog instaliranja blizu područja gdje žive ljudi. Velika i glavna mana ovakvih vjetroagregata je ta što se vrlo često ne mogu sami zaletjeti, već trebaju dodatne uređaje i opremu za pokretanje rotora, a to uzrokuje dodatne troškove i gubitke vremena i novca. Pojavljuju se problemi i sa dinamičkom stabilnošću jer na lopatice djeluje više sila odjedanput. [1] U radu je naglašeno da vjetroagregati s horizontalnom osi vrtnje postavljaju uvijek u smjeru puhanja vjetra kako bi se što više i što bolje iskoristila energija vjetra za proizvodnju električne energije. U 12. stoljeću su se koristili vjetroagregati s četiri lopatice, u 19. stoljeću sa većim brojem lopatica, a danas su zastupljeniji vjetroagregati s najčešće tri lopatice zbog bolje učinkovitosti i kompatibilnosti. Izvedba vjetroagregata s tri lopatice ima brojne prednosti, a neke najvažnije su: mogućnost promjena nagiba i položaja lopatica, veća učinkovitost zbog vodoravnoga dizajna osi vrtnje, lakše održavanje i popravljivanje u slučaju kvara. Vrlo je bitno napomenuti da je u radu više puta naglašeno da su oba tipa vjetroagregata vrlo važna i korisna, ali i da svaka ima svoje prednosti i mane, ovisno o vremenu i mjestu primjene određenog tipa vjetroagregata. Međutim, najviše su prisutni vjetroagregati s horizontalnom osi vrtnje zbog toga što njihova učinkovitost doseže do čak 60% .[1]

Istraživanje iz područja vjetroagregata je provodilo i Sveučilište iz Anbara u Iraku. Oni su analizirali performanse vjetroagregata s obzirom na utjecaj različitih prirodnih parametara.[2] U MATLAB-u su izradili različite simulacijske modele za opisivanje i eksperimentiranje s različitim vremenskim parametrima. Iz odziva simulacijskih modela su došli do saznanja da performanske vjetroagregata ovise o različitim parametrima kao što su: temperatura, vlaga, duljina i vrta lopatica vjetroturbine, tlak zraka i gustoća zraka. Određivali su ovisnost izlazne snage modela o ulazu. Također, obratili su pozornost na isplativost ulaganja na temelju zaključka o utjecaju različitih faktora vjetra na mehaničku energiju koja će se, u konačnici, pretvoriti u korisnu električnu energiju. Kao zaključak ovoga istraživanja, naveli su da utjecaj okoliša je vrlo bitan čimbenik za proizvodnju električne energije bez obzira na to kakav tip vjetroagregata se koristi. [2]

Istraživanje o utjecajima prirodnih čimbenika na vjetroagregate je provelo Sveučilište Waseda pod temom „Analiza dinamičkog odziva vjetrojedinica na obali za vrijeme potresa i jakog vjetra“. [3] Oni navode da bi uvijek trebala biti uzeta u obzir mogućnost prirodnih nepogoda kao što su potresi i jaki udari vjetra. Navode da se vrlo rijetko događaju dva ekstremna događaja istovremeno, stoga se dio proračuna može izostaviti iz konstrukcijskog dizajna. Naveli su da se jak vjetar i opterećenje od potresa proučavaju probabilističkom metodom. Prepostavili su da su sile vjetra u stacionarnom stanju, dok sile potresa ovise o vremenu. Proračunima su došli do saznanja da je ukupna sila koja djeluje na vjetroagregat za vrijeme udara vjetra i djelovanja potresa jednaka zbroju sile vjetra, sile vala do uporabljivog stanja vjetroagregata i same sile potresa. Kao zaključke ovih istraživanja naveli su da se istovremeno udari vjetra i udari potresa mogu dobiti pomoću Weibullovih razdioba vjerojatnosti. Te vjerojatnosti su izuzetno male. Također vjetrojedinice koje su dizajnirane za vrlo jake udare vjetra kao što su to npr. tajfuni, imaju poprilično velik seizmološki kapacitet za sve jačine potresa, što znači da vjetroagregati mogu izdržati ekstremne uvjete rada, a da pri tome ne dođe do značajnih oštećenja, kvarova ili rušenja samih vjetroagregata. [3]

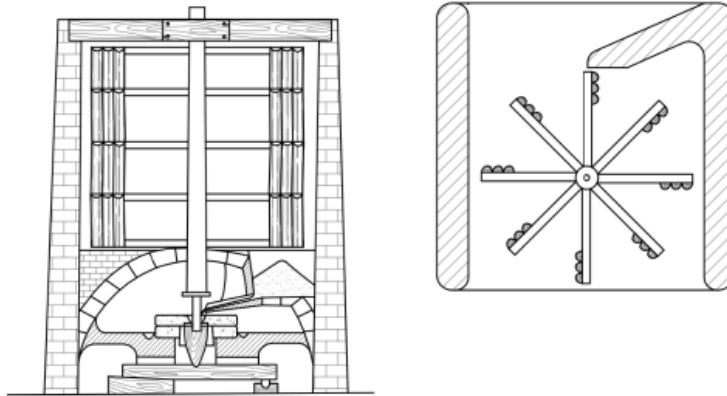
### **3. VJETAR KAO TEMELJNI IZVOR ENERGIJE**

U suštini,energija vjetra je energija koja se dobija iz nuklearne fuzije vodika u helij u Sunčevoj jezgri. [4] Fuzijski proces u kojem iz vodika nastaje helij stvara određenu toplinu i emitira elektromagnetsko zračenje koje se širi u svim smjerovima oko Sunca u Svemir. Međutim,vrlo mala količina Sunčevog zračenja dopiye na Zemlju i ona je dovoljna na pokrivanje gotovo pa svih potreba za Sunčevom energijom na Zemlji. [4] Energija vjetra se smatra jednom od glavnih obnovljivih izvora energije i jednom od važnih čimbenika u svijetu trgovanja energijom. [4] U suporedbi s ostalim tradicionalnim izvorima energije,uporaba energije vjetra ima mnoštvo dobrobiti i prednosti jer,za razliku od fosilnih i nuklearnih goriva,nema štetnih plinova niti otpada koji bi mogli biti pogubni za okoliš. [4] Vjetar je,činjenično,usmjereno ili kaotično gibanje čestica zraka iz područja višeg u područje nižeg tlaka zraka. Prilike puhanja vjetra proizlaze iz gradijenta atmosferskog tlaka zraka nad nekim područjem. Gradijent tlaka ovisi o reljefu,zagrijavanju kopna i mora kao i o samim osobinama zračnih masa. Pretvorba energije Sunca u energiju vjetra je poprilično složen proces i vrijedi pravilo ako se povećava gradijent atmosferskog tlaka,veća će biti i brzina vjetra. Najbitniji čimbenici koji utječu na vjetar su: Coriolisov učinak,nejednoliko Sunčevo zagrijavanje i geografski (reljefni) utjecaji.[4]

#### **3.1. Uporaba energije vjetra kroz povijest**

Pokazatelji i dokazi primjene energije vjetra u drevnim civilizacijama sežu unazad par tisuća godina. Skretanje pozornosti na uporabu energije vjetra proizlazi iz činjenice da su ljudi već davno spoznali moć i potencijal energije vjetra kao oblika energije u budućnosti. [4] Od pradavnina vjetar je služio za pokretanje brodova jedrenjaka,odnosno za jedrenje. Izvor iz 4000.godine prije Krista kazuje na to da su Kinezi među prvim ljudima na svijetu počeli ugrađivati jedra na svoja plovila i tako olakšali upravljanje i pogon plovila. Također,spominje se da su stari Egipćani oko 3400.godine pr.Kr. također koristili plovila s jedrima za prijevoz dobara,robe i ljudi. [4] Plovila upravljana energijom vjetra još dugo su bila na glasu kao najbolja prijevozna sredstva sve do pojave parnoga stroja u 19.stoljeću.S druge strane,energija vjetra se koristila za pogon mlinova za mljevenje žitarica. [4] Na istoku tadašnje Perzije energija vjetra se koristila za pogon mlinova i crpljenje vode pomoću vjetrenjača sa vertikalnom osi. U 12.stoljeću u Europi se pojavljuju vjetrenjače s horizontalnom osi koje su imali mnoge prednosti u odnosu na vjetrenjače sa vertikalnom osi. Ponajviše su se koristile u srednjoj Europi i Sjevernoj

Americi tijekom mnogo stoljeća, a karakterizira ih bolja radna učinkovitost i bolje mehaničke karakteristike. [4]

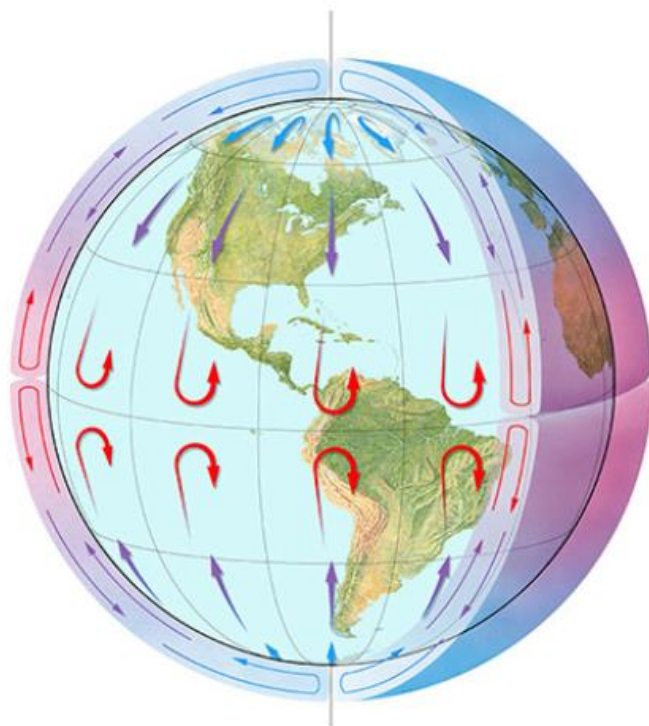


Sl. 3.1. Primjer vodoravne vjetrenjače iz Perzije [4]

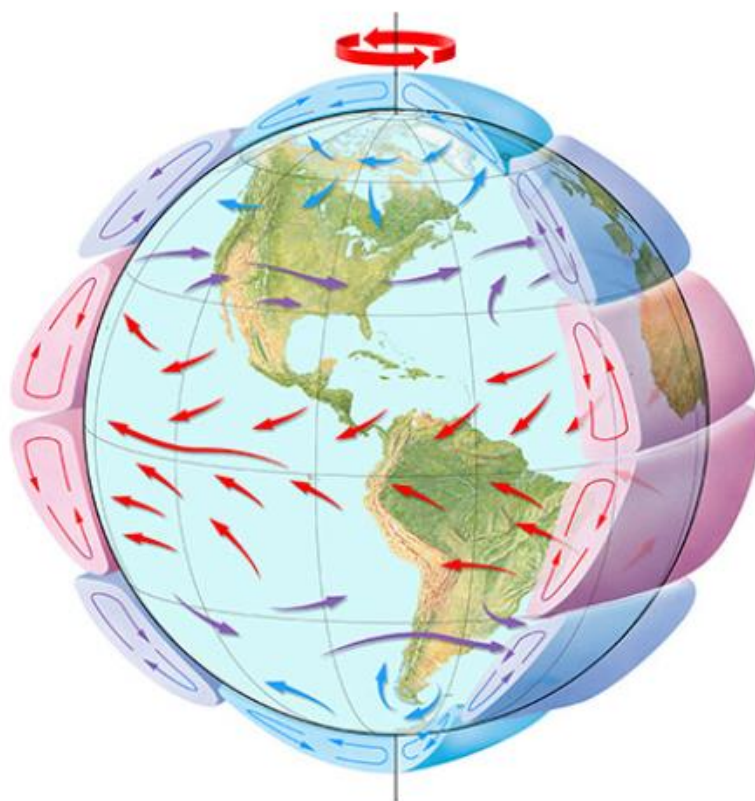
## 3.2. Čimbenici koji utječu na vjetar

### 3.2.1. Coriolisov učinak

Zemljina vlastita rotacija je veoma važan čimbenik za smjer kretanja vjetra kao i za njegovu brzinu. Coriolisova sila, odnosno učinak, negativno utječe na smjer atmosferskih kretanja zraka. Coriolisov efekt ovisi o zemljopisnoj širini, stoga jednak je nuli na ekvatoru, a povećava se prema polovima. [4] Postoje globalni i lokalni vjetrovi. Globalni vjetrovi su vjetrovi na koje gotovo pa i ne utječe podneblje i reljef. Oni pušu na visinama od oko 1000 metara i više. Najznačajnije struje su: Polarna struja, Halejeva struja i Farellova struja. [4] Njihov uzrok je Zemljina rotacija i nejednoliko zračenje i zagrijavanje Sunca. Također, postoje tzv. lokalni vjetrovi čija brzina i snaga puhanja ovisi o zemljopisnim obilježjima kao i o samom reljefu. Ti vjetrovi pušu uz samu površinu Zemlje. Globalni vjetrovi donekle utječu i ovisе o globalnim vjetrovima. [4] Na slici 3.1. može se vidjeti smjer puhanja vjetrova bez rotacije i Coriolisovog učinka, dok na slici 3.2. može se vidjeti prikaz strujanja planetarnih vjetrova sa rotacijom Zemlje i uz prisustvo Coriolisovog učinka.



Sl. 3.1. Planetarni vjetrovi bez utjecaja rotacije i Coriolisovog učinka[5]



Sl. 3.2. Planetarni vjetrovi uz prisutnost rotacije i Coriolisovog učinka[5]

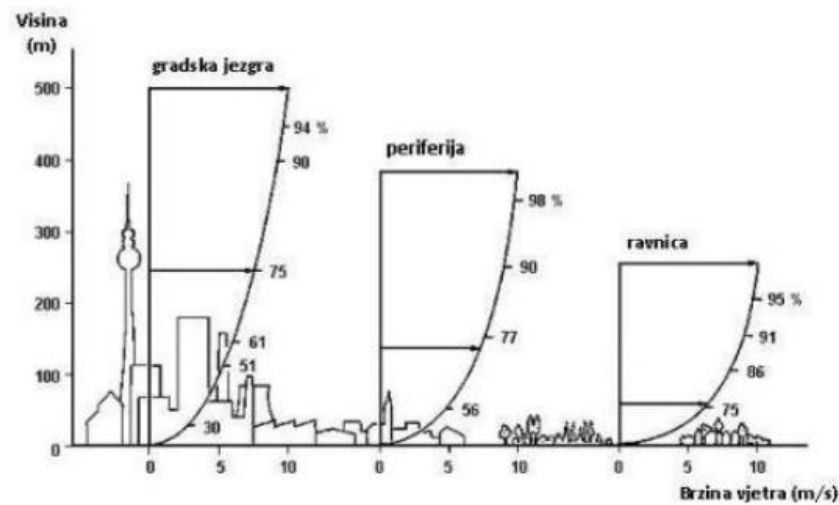
### 3.2.2. Nejednoliko Sunčevo zagrijavanje

Iako postoje mnogi uzroci nastajanja zračnih masa i puhanja vjetrova u raznim smjerovima, najvažniji čimbenik je nejednoliko sunčevo zagrijavanje Zemljine površine. [4] Ovakva se prirodna pojava može objasniti s četiri uzroka. Područje oko ekvatora primi najveću količinu Sunčeva zračenja i topline jer je to područje okomito na smjer širenja zraka Sunca. S druge strane, područje na polovima Zemlje je usporedno sa smjerom širenja zraka Sunca, stoga do polova dolazi mala količina Sunčeva zračenja. [4] Kako Zemljina površina nije idealno ravna niti jednolika, dolazi do prostorno nerazmjernog zagrijavanja površine. Zbog toga se stvara temperaturni gradijent idući od ekvatora prema polovima. U isto vrijeme se stvara i gradijent tlaka atmosferskog zraka idući od polova prema ekvatoru. [4] Zbog zagrijavanja zraka na ekvatoru, on ima manju gustoću i počinje se kretati prema polovima na velikim visinama, dok se hladniji zrak na polovima, koji ima veću gustoću, počinje kretati prema ekvatoru, ali uz samu Zemljinu površinu. Na taj način nastaju zračne mase koje se kreću duž Zemlje i uzrok su vjetru. Drugi važan razlog je taj što je Zemljina os ima nagib od  $23.5^\circ$  u odnosu na ekliptiku. [4] Taj nagib je uzrok nejednolikom cikličkom zagrijavanju i uzrok raznim promjenama vremena. Zemljina je površina prikriivena raznim prirodnim materijalima kao što su npr. kamenje, pijesak, voda, led i snijeg i to je jedan od važnih uzroka nejednolikog zagrijavanja površine. Svaki od tih materijala ima drugačiji stupanj apsorpcije i refleksije Sunčeva zračenja. [4] To dovodi do toga da čak i na jednakim geografskim širinama imamo različite prirodne pojave kao što su pustinje i ledene površine. Kao četvrti važni razlog navodi se ovisnost zagrijavanja o topografiji Zemljine površine. Na Zemlji postoje mnoge planine, ravnice i ostali oblici zemljišta koji primaju različitu količinu Sunčeva zračenja jer imaju sunčane i sjenovite strane. [4]

### 3.2.3. Lokalni geografski čimbenici

Hrapavost Zemljine površine je još jedan od najvažnijih čimbenika koji uzrokuje gibanje zraka, odnosno vjetar. Uz to, jako bitan faktor je i nepravilnost površine Zemlje čiji je uzrok sila prirode ili razne geografske strukture i formacije koje su načinili ljudi. Što je veća hrapavost i nepravilnost površine, to je veći otpor Zemlje ka vjetru, što implicira na to da je brzina vjetra manja. Stoga, iz slike 3.3. možemo primijetiti da brzina vjetra u gradovima je puno manja na nižim visinama, nego na istim visinama u nizinama. Shodno tome, određene geografske pojave i oblici mogu značajno pridonijeti višoj brzini vjetra

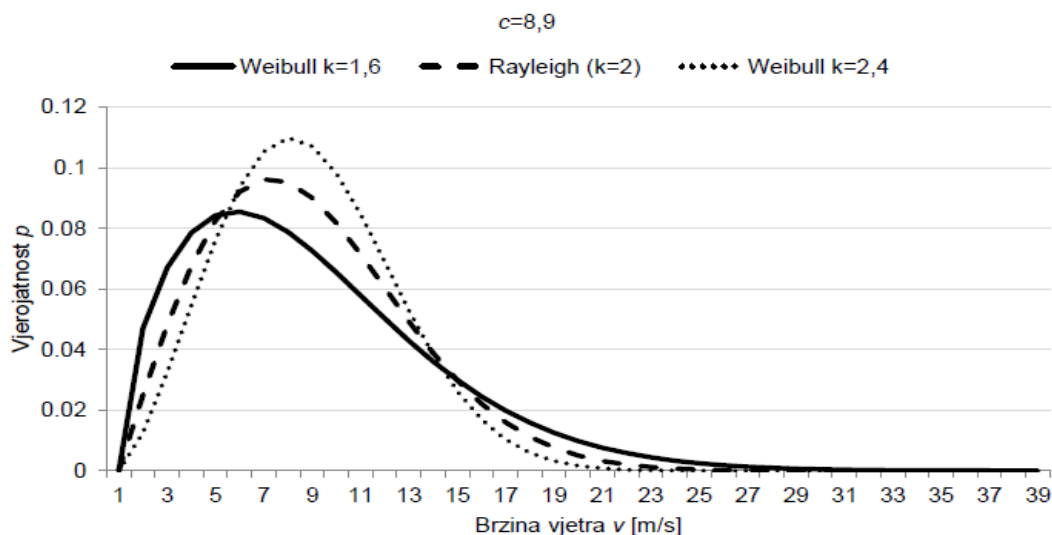
npr. planinski prolazi često mogu uzrokovati stvaranje izuzetno jakih orkanskih udara što može imati za posljedice teško i trajno oštećenu imovinu ljudi koji žive u tim područjima. [4]



Sl. 3.3. Ovisnost brzine vjetra o hrapavosti i nepravilnosti terena [4]

### 3.3. Statistička obilježja vjetra

Tijekom dana, smjer i jačina puhanja vjetra se izmjenjuje tj. vjetar ne puše uvijek u istome smjeru svaki dan niti istom jačinom. Jačina i smjer puhanja vjetra ovise o klimatskim obilježjima podneblja, nadmorskoj visini, godišnjem dobu i sl. [6] U idealnome slučaju, vjetar treba puhati umjerenom brzinom svaki dan. Iako takvi slučajevi ne postoje, prati se učestalost i brzina puhanja vjetra na nekom području kako bi se mogla predvidjeti proizvodnja energije uz posredstvo vjetroagregata. Kao rezultat praćenja brzine i učestalosti vjetra, dobiju se funkcije razdiobe pomoću kojih je moguće predvidjeti vjerojatnost puhanja određene brzine vjetra. Najčešće korištene funkcije su: Weibullova i Rayleighova funkcija razdiobe koje su prikazane na slici 3.4. [6]



Sl. 3.4. Weibullova i Rayleighova funkcija razdiobe [6]

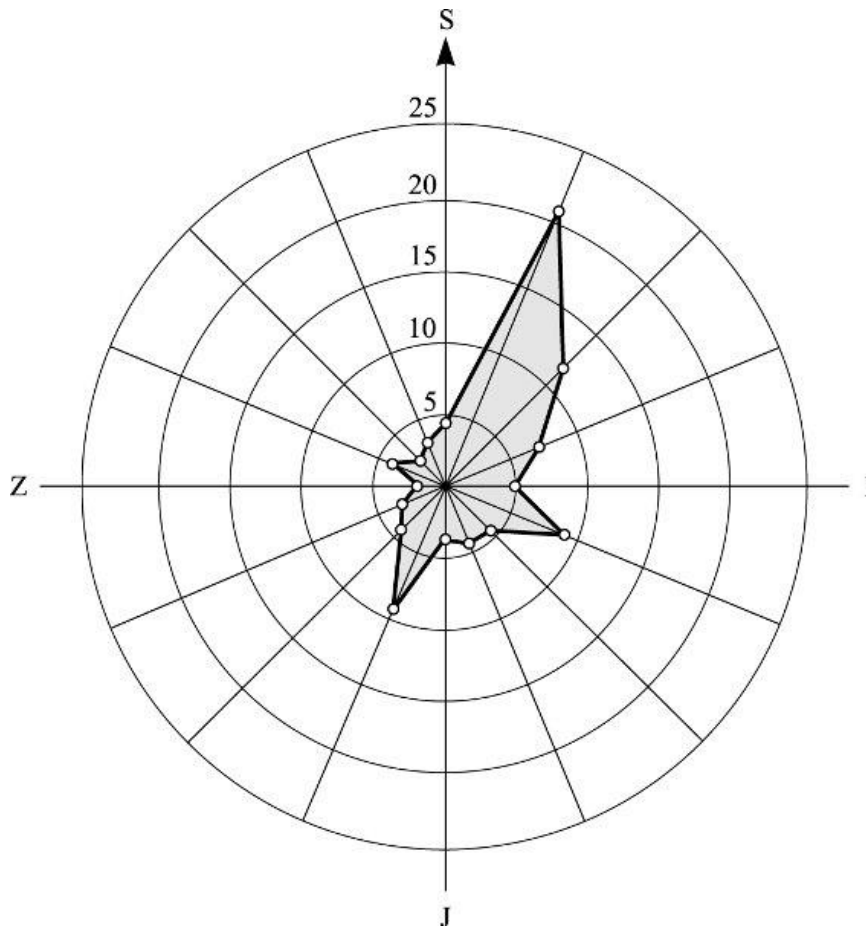
Također, jačinu vjetrova možemo prikazati tablično, a to se prikazuje pomoću Beaufortove ljestvice, odnosno tablice.

		Brzina				Visina valova	
		km/h	m/s	kt	mph	m	ft
0 Bf	tišina	< 1	0-0.2	< 1	< 1	-	-
1 Bf	lahor	1-5	0.3-1.5	1-3	1-3	0.1(0.1)	0.25(0.25)
2 Bf	povjetarac	6-11	1.6-3.3	4-6	4-7	0.2(0.3)	0.5(1)
3 Bf	slabi	12-19	3.4-5.4	7-10	8-12	0.6(1)	2(3)
4 Bf	umjereni	20-28	5.5-7.9	11-16	13-18	1(1.5)	3.5(5)
5 Bf	umjereni jaki	29-38	8.0-10.7	17-21	19-24	2(2.5)	6(8.5)
6 Bf	jaki	39-49	10.8-13.8	22-27	25-31	3(4)	9.5(13)
7 Bf	žestoki	50-61	13.9-17.1	28-33	32-38	4(5.5)	13.5(19)
8 Bf	olujni	62-74	17.2-20.7	34-40	39-46	5.5(7.5)	18(25)
9 Bf	jaki olujni	75-88	20.8-24.4	41-47	47-54	7(10)	23(32)
10 Bf	orkanski	89-102	24.5-28.4	48-55	55-63	9(12.5)	29(41)
11 Bf	jaki orkanski	103-117	28.5-32.6	56-63	64-72	11.5(16)	37(52)
12 Bf	orkan	>=118	>=32.7	>=64	>=73	14(-)	45(-)

Tablica 3.1. Beaufortova ljestvica jačine puhanja vjetrova [7]

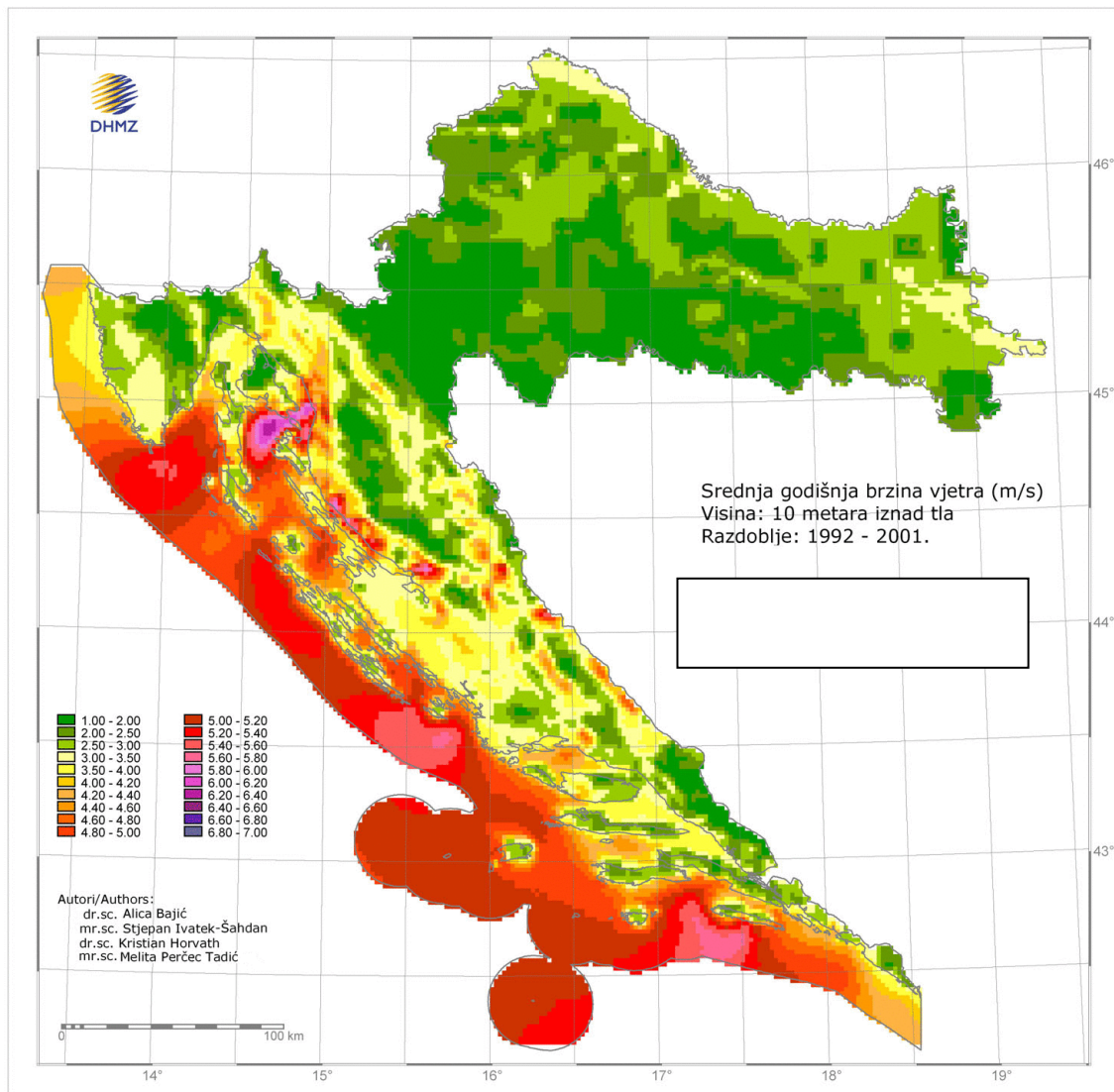
Ružom vjetrova prikazujemo jačinu i smjerove puhanja vjetrova na nekom području, odnosno na mikrolokaciji. Ruža vjetrova je najčešće podijeljena na 8 ili 16 dijelova, a za njezinu izradu potrebno je duži vremenski period, obično je to više od 10 godina. Mjerenje jačine i određivanje smjera vjetrova se uobičajeno vrši u točno određeno vrijeme u danu npr. u 8 sati, 14 sati i u 19 sati. Na slici 3.5. možemo vidjeti primjer ruže vjetrova. [4]





Sl. 3.5. Godišnja ruža vjetrova Marjan, Split [8]

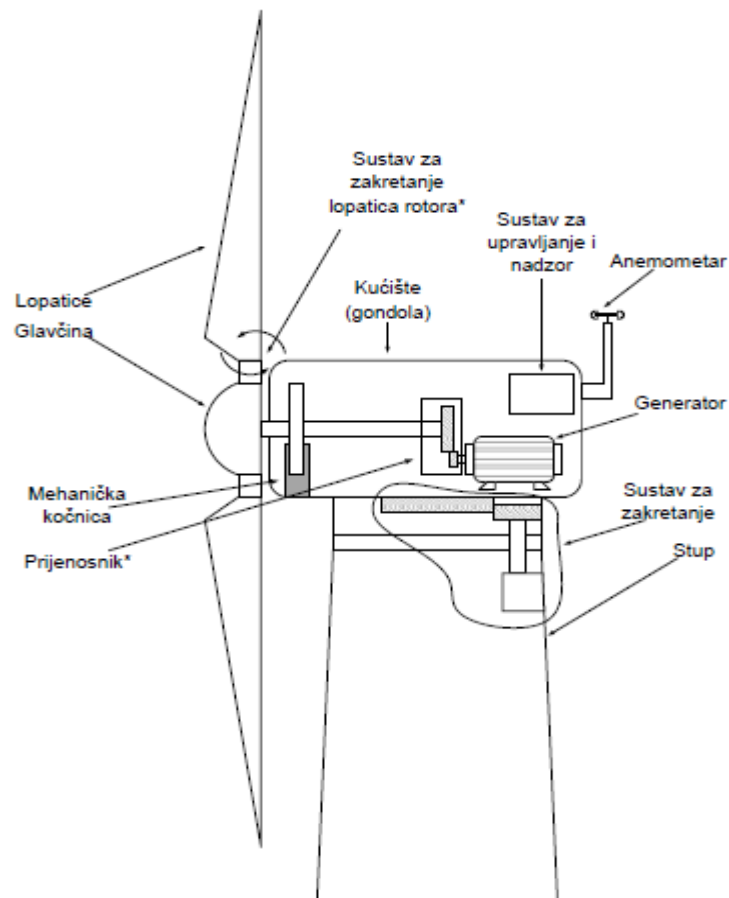
Uz to, u upotrebi je i atlas vjetrova koji također služi za predviđanje očekivane brzine vjetra na nekom području (najčešće je to neko veće područje). Na atlasu vjetrova je, u većini slučajeva, prikazana i očekivana snaga puhanja vjetra po jedinici površine. [4] Na slici 3.6. može se vidjeti atlas vjetrova u Republici Hrvatskoj na 10 metara iznad tla u razdoblju od 1992. do 2001. godine. Shodno tome, iz atlasa vjetra se može vidjeti i vjetropotencijal nekog određenog područja. Sa slike 3.6. može se primijetiti da najmanji vjetropotencijal ima Slavonija i Hrvatsko Zagorje, a najveći vjetropotencijal ima Kvarner i Dalmacija.



Sl. 3.6. Atlas vjetrova Hrvatske na 10 metara iznad tla, od 1992. do 2001. godine [9]

## 4. VJETROAGREGATI

Vjetroagregat ili vjetrogenerator je električki stroj koji kinetičku energiju vjetra pretvara u mehaničku, koja se zatim pretvara u električnu energiju. Često se vjetroagregati nazivaju i vjetroturbinama. Na slici 4.1. mogu se vidjeti glavni dijelovi vjetroagregata koji se koriste za proizvodnju električne energije iz energije vjetra. [6]



Sl. 4.1. Osnovni dijelovi modernog vjetroagregata[6]

Stup – napravljen je od čvrstog materijala koji je otporan na vibracije. Služi za podupiranje gondole na određenu visinu na kojoj vjetar puše odgovarajućom brzinom za proizvodnju električne energije.[6]

Gondola – služi kao kućište za mehaničke i električke dijelove vjetroagregata. Također, služi i kao zaštita za iste. Neke gondole su prilagođene tako da na njih može sletjeti helikopter u slučaju kvara.[6]

Rotor – služi za okretanje vjetrogeneratora koji proizvodi električnu energiju. Glavni dijelovi su mu glavčina i lopatice.[6]

Mehanička kočnica – u slučaju prejakoga vjetra, mehanička kočnica će zakočiti rotor i time spriječiti uništavanje vjetroagregata.[6]

Generator – može biti sinkroni i asinkroni. Služi za pretvaranje mehaničke energije u električnu energiju. Vrlo je bitno da je stupanj djelovanja generatora što veći kako bi nam ulaganje i gradnja vjetroagregata bila što isplativija.[6]

Sustav za zakretanje lopatica – to je sustav koji se brine za što bolju iskoristivost vjetra koji dopire do vjetroturbine. Ako puše prejak vjetar, tada se lopatice moraju staviti u takav položaj da je sila uzgona što manja kako ne bi došlo do oštećenja samog vjetroagregata. Svi moderni vjetroagregati današnjice imaju ovakve sustave.[6]

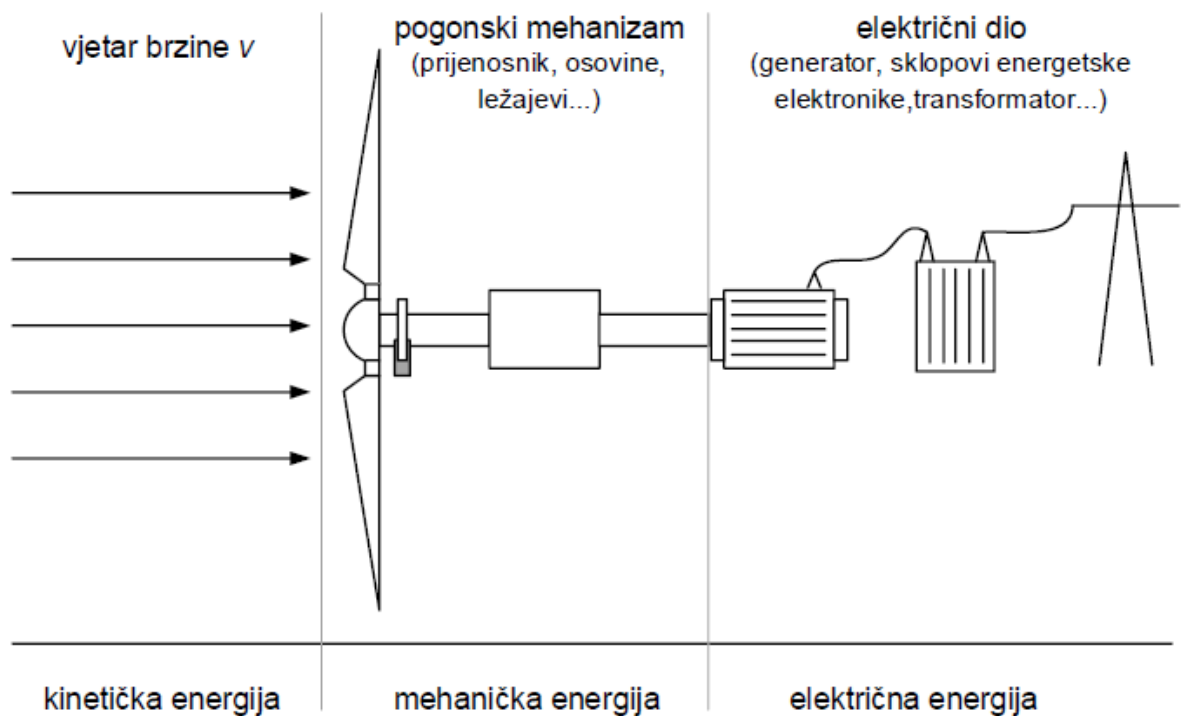
Sustav za zagretanje – sustav koji zakreće cijelu gondolu u smjeru gdje vjetar puše okomito na lopatice tj.s ovakvim sustavom se poboljšavaju karakteristike cijeloga vjetrogeneratora.[6]

Prijenosnik – to je zapravo sustav koji povećava brzinu sa oko 40 okretaja u minuti na 1200 do 1600 okretaja u minuti. Nužan je član u proizvodnji električne energije iz energije vjetra.[6]

Anemometar – služi za mjerenje i praćenje brzine vjetra. Anemometar je povezan sa sustavom za upravljanje i nadzor.[6]

Sustav za upravljanje i nadzor – sustav koji upravlja, kontrolira, ispituje i informira vjetroagregat u potpunosti. Ovaj je sustav sačinjen od mikroprocesorskih sklopova za upravljanje. Može se nalaziti unutar samog vjetroagregata, ali je najčešće na nekom udaljenijem mjestu kako bi se lakše imao uvid u stanje vjetroagregata. Tipovi sustava za upravljanje i nadzor koji su udaljeni od samog vjetroagregata moraju imati i prikladan sustav za telekomunikaciju.[6]

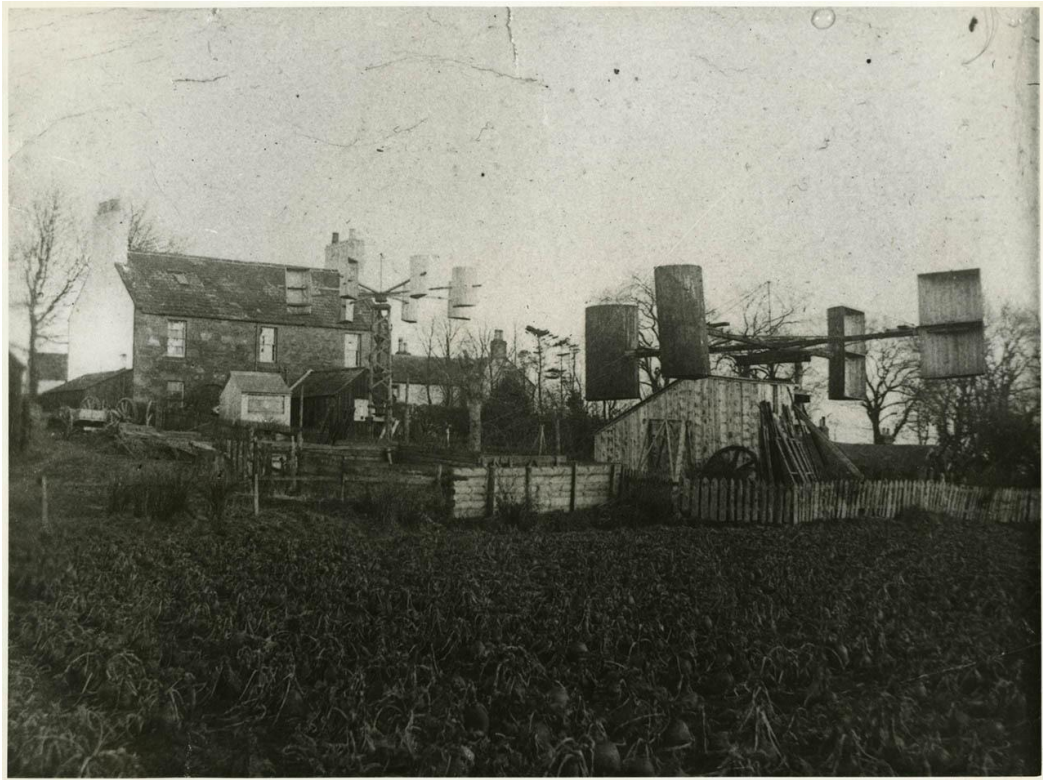
Ukoliko imamo više vjetroagregata istoga tipa koji se nalaze na međusobno bliskim udaljenostima, onda govorimo o vjetroelektrani. To je postrojenje u kojemu se kinetička energija vjetra pretvara u mehaničku, a zatim u električnu energiju koja je podobna za korištenje. [6] Na slici 4.2. možemo vidjeti skicu pretvorbe kinetičke energije vjetra u električnu energiju uz posredstvo vjetroagregata.



Sl. 4.2. Prikaz pretvorbe energije vjetra u električnu energiju [6]

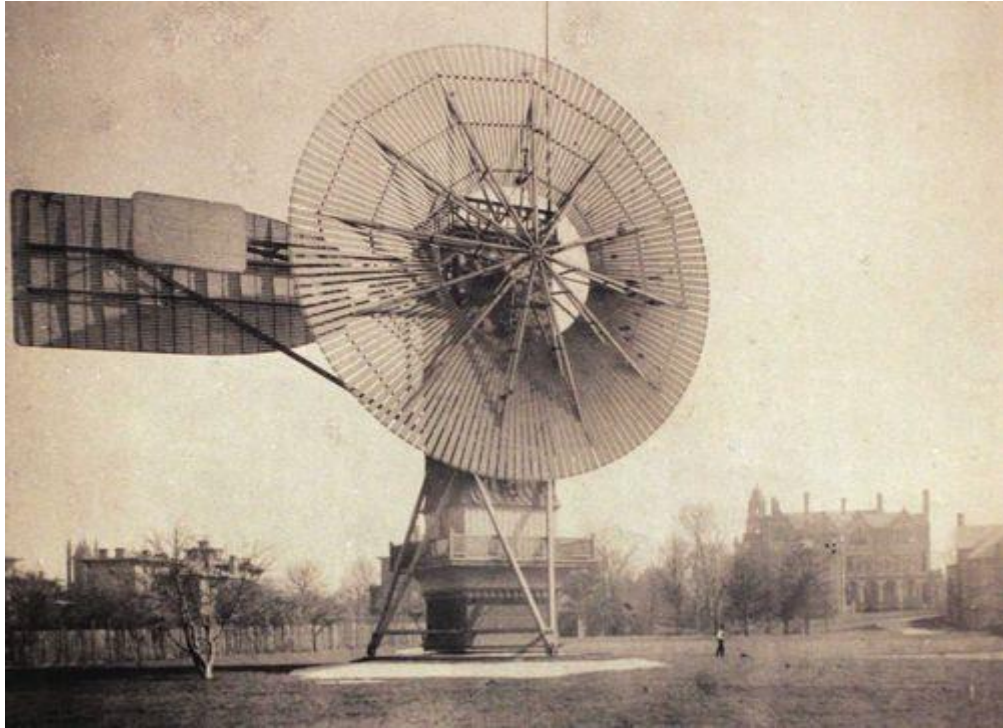
#### 4.1. Uporaba vjetroagregata kroz povijest

Škotski inženjer James Blyth, prof. dugo je godina radio na sveučilištu Anderson u Glasgowu. Uz pomoć akumulatorskih baterija profesora Frenchmana Faure, 1887. godine instalirao je vjetroagregat čija je namjena bila napajanje svjetla u njegovoj vikendici. Sam vjetroagregat je bio smješten u dvorištu vikendice, a nakon prvih uspjeha, Blyth je ponudio svojim susjedima napajanje pomoću njegovog vjetroagregata, što nije zaživjelo. Također, ponudio je korištenje vjetroagregata azilu u blizini, ali ideja nije bila prepoznata među ljudima. [10]



Sl. 4.3. Vjetroagregat profesora Jamesa Blytha iz 1887.godine[11]

Godine 1888. Charles Brush konstruirao je i izgradio vjetroagregat koji je bio puno napredniji od vjetroagregata profesora Blyth-a. To je bio prvi vjetroagregat sa automatskom proizvodnjom električne energije iz energije vjetra u to doba. Imao je promjer rotora 17 metara i imao je 144 lopatice koje su bile izrađene od cedrovine. Turbina je radila preko 20 godina, a njezina namjena je bila puniti akumulatorske baterije u podrumu njegove vile. Turbina se sporo okretala, stoga je imala snagu od samo 12 kW, što nije bilo dovoljno za hiperproizvodnju energije. Uočeno je da takve turbine imaju mali stupanj iskorištenja. Kasnije je Danac Poul la Cour otkrio da turbine s manje lopatica i većom brzinom vrtnje rotora imaju veći stupanj iskorištenja.[12] Uz to, Poul la Cour osnovao je prvo društvo vjetroelektričara u Danskoj. Vjetroturbine preplavile su tržište do 1918. godine, tako da je oko 120 komunalnih poduzeća imalo barem jedan vjetroagregat za vlastite potrebe, tipične snage od 20 do 35 kW. U to vrijeme, vjetroturbine su omogućavale opskrbu električnom energijom za oko 3% danskih potrošača energije. Međutim, interes za izgradnju vjetroagregata je slabio do krize koja je nastala tijekom Drugog svjetskog rata.[13]



Sl. 4.4. Brushov vjetroagregat iz 1888.godine[14]

Od početka pa sve do kraja 70-ih godina prošloga stoljeća, nafta, zemni plin i ugljen su postali primaran izvor energije jer su bili najjeftiniji i najdostupniji korisnicima. Tijekom tih godina, opada interes za razvoj i unapređenje vjetroagregata, odnosno svih postrojenja na obnovljive izvore energije. Međutim, u zemljama kao što je npr. Danska, uveliko se iskorištava energija vjetra. Prepoznajući potencijal vjetroagregata, Sjedinjene Američke Države također rade na unapređenju izvedbi vjetroagregata. Neki vjetroagregati su bili postavljeni i u siromašnim predjelima Afrike i Antarktike. Godine 1926. ponesen je zahtjev za patent izumitelja Georges-a Jean Marie Darrieusa, francuskog zrakoplovnog inženjera. Taj izum je bio, zapravo, vjetroagregat s vertikalnom osi vrtnje. Vertikalna os je omogućavala postavljanje postrojenja što niže, pri zemlji kao i neovisnost od puhanja vjetra tj. mogao se je iskoristiti vjetar iz svih smjerova. Stoga, sustav za zakretanje je bio potpuno nepotreban za normalno funkcioniranje vjetroagregata. Takva vjetroturbina se je nazivala po samom izumitelju-Darrieusova vjetroturbina. Izgled Darrieusove turbine može se vidjeti na slici 4.5.[15]



Sl. 4.5. Darrieusova turbina[15]

Sve do 70-ih godina 20.stoljeća,svjetsko tržište nije bilo zainteresirano za proizvodnju i moderniziranje vjetroagregata. Godine 1975.prva američka vjetroelektrana je puštena u pogon i opskrbljavala je oko 4200 domova električnom energijom. Godine 1978.profesori i učenici Tvind škole izumili su vjetroturbinu od 2 MW koja je pomogla proizvođačima vjetroelektrana da dođu do rezervnih dijelova za vjetroagregate. Vjetroturbina škola Tvind radi još i danas.U 80-im godinama 20.stoljeća sve više država gradi velika postojenja za proizvodnju električne energije na morima i oceanima,npr.1980.god. Danska je postavila nekoliko vjetroelektrana na more gdje je visok vjetropotencijal. Tijekom osamdesetih godina povećava se broj potrošača energije iz obnovljivih izvora,a do 1991.godine prodano je više od tisuću vjetroagregata danske kompanije Vestas. Početkom 21.stoljeća,snage vjetroelektrana dostižu i do 100 MW,a poslije 2008.godine čak i do 120 MW.Do 2013.godine,sve više država postavlja pomorske vjetroturbine. Očekuje se porast broja vjetroelektrana u narednim desetljećima kako bi se smanjila emisija stakleničkih plinova u atmosferi i kako bi se nafta,zemni plin,ugljen i nuklearno gorivo sve više potisnulo iz upotrebe.[16]



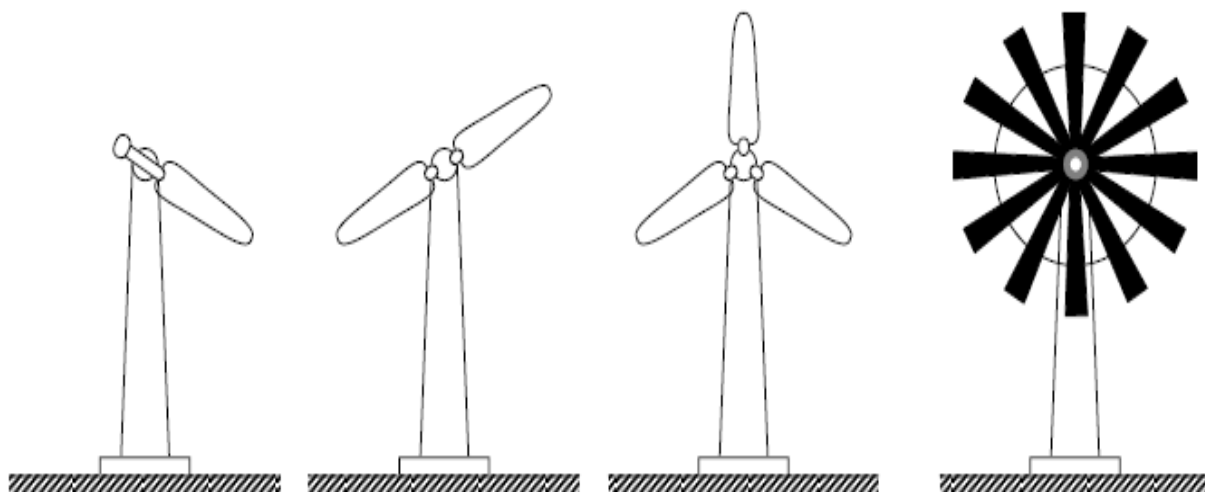
## **4.2. Opća podjela vjetroagregata**

Općenito, vjetroagregati se mogu podijeliti na mnogo načina i prema karakteristikama koji ih opisuju. Možemo ih podijeliti:

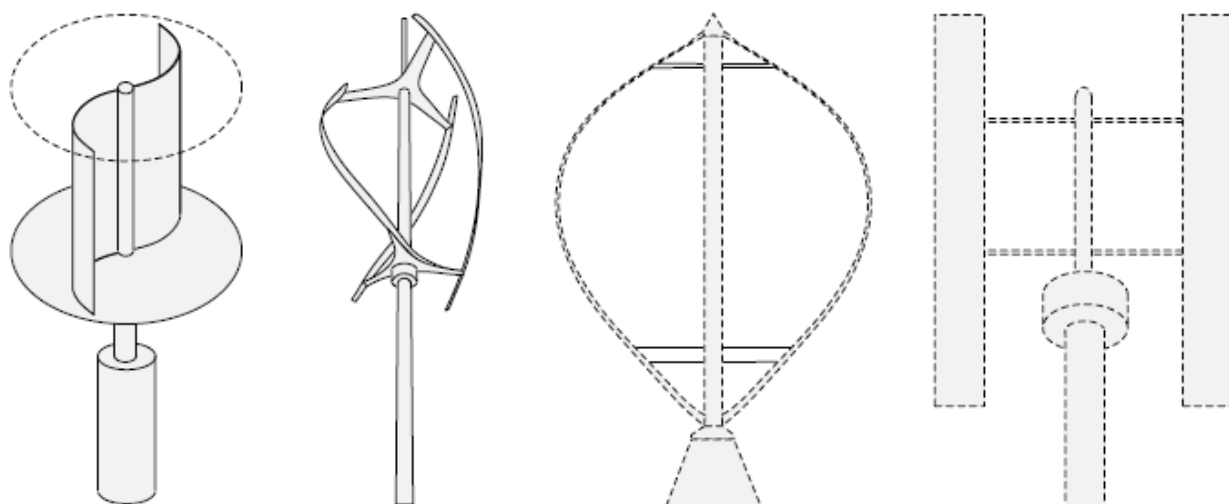
1. Prema osi vrtnje, vjetroagregati mogu biti s okomitom i vodoravnom osi vrtnje
2. Prema izlaznoj snazi, a mogu biti male, srednje i velike snage
3. Prema vrsti generatora ugrađenih u njih, a to su sa sinkronim, asinkronim ili istosmjernim generatorima
4. Prema brzini vrtnje rotora, a mogu biti sa stalnom brzinom vrtnje i s promjenjivom brzinom vrtnje rotora
5. Prema mjestu rada, odnosno prema mjestu njihove instalacije, a mogu se razlikovati vjetroagregati na kopnu i vjetroagregati na pučini [6]

### **4.2.1. Podjela vjetroagregata prema osi vrtnje**

Prema osi vrtnje, vjetroagregate dijelimo na one s horizontalnom osi vrtnje i na one s vodoravnom osi vrtnje. Stvar je u tome kako je postavljena os vrtnje, odnosno vratilo generatora koje povezuje glavčinu i prijenosnik. Vjetroagregati s horizontalnom osi vrtnje mogu se razlikovati po broju lopatica turbine, sustavu zakretanja gondole, je li os vrtnje postavljena uz smjer djelovanja vjetra ili ne. Također, bitna stvar kod podjele vjetroagregata s horizontalnim smjerom vrtnje je postojanje difuzora ili ne. Postoje vjetroagregati s jednom lopaticom i protuutegom, ali su se kao takvi koristili samo u eksperimentalnoj fazi i nisu imali zadovoljavajuće karakteristike i proizvodili su previše buke. Također, postoje vjetroagregati s dvije i tri lopatice na rotoru. Takvi tipovi vjetroagregata imaju znatno bolje karakteristike zbog simetrije turbine. Najbolje karakteristike i najtiši rad imaju vjetroagregati s trima lopaticama. Uz to, imaju znatno viši stupanj djelovanja, što je najvažnije. S druge strane, u upotrebi su i vjetroagregati s okomitim smjerom vrtnje rotora. Takvi vjetroagregati su znatno tiši nego oni s vodoravnim smjerom vrtnje, nije im potreban sustav za zakretanje, ali imaju puno manji stupanj djelovanja od vjetroagregata s vodoravnim smjerom vrtnje. Kao jedna od prednosti im je i neovisnost od smjera puhanja vjetra. Zbog svojega mirnog i tihog rada pogodni su za korištenje u naseljenim mjestima. Najčešći tipovi su : spiralni tip, Savoniusov tip, H-tip i Darrieusov tip. [6]



Sl. 4.6. Razni tipovi vjetroagregata s vodoravnom osi vrtnje [6]



Sl. 4.7. Razni tipovi vjetroagregata s okomitom osi vrtnje [6]

Prednosti vjetroagregata s vodoravnom osi vrtnje su: veća učinkovitost, mogućnost zakretanja gondole, mogućnost podešavanja i odabir povoljnog položaja lopatica, bolja iskoristivost vjetra, a mane su: potreban sustav za zakretanje, gradnja visokih stupova je skupa, mogući problemi u radu pri turbulencijama vjetra. Prednosti vjetroagregata s okomitom osi vrtnje su: proizvode manje buke, nepotrebna gradnja visokih stupova, nije im

potreban sustav za zakretanje, lakše održavanje i mogućnost popravka u slučaju kvara zbog njihove niske gradnje, a mane su im: vrlo mala učinkovitost i iskoristivost vjetra, potreban im je sustav za pokretanje vratila turbine u slučaju puhanja slabog vjetra i dr. [6]

#### 4.2.2 Podjela vjetroagregata prema izlaznoj snazi

Vjetroagregati s obzirom na izlaznu snagu koju daju se mogu podijeliti na one s malom, srednjom i velikom izlaznom snagom. Mali vjetroagregati su vjetroagregati izlazne snage do 20 kW i oni su namjenjeni proizvodnji električne energije za kućanstva. Srednji vjetroagregati su vjetroagregati izlazne snage od 20 kW pa sve do 200 kW i njihova je namjena proizvodnja energije za prodaju. Veliki vjetroagregati su vjetroagregati nazivne snage više od 200 kW i oni se, najčešće, ugrađuju u vjetroelektrane i opskrbljuju potrošače koji se nalaze na velikim udaljenostima od njih. Pored toga, postoje i vjetroagregati izrazito male snage tzv. mikroagregati. Oni se ugrađuju na mjesta koja nemaju mogućnost priključka na mrežu. Obično im je izlazna snaga od nekoliko kilovata. Također, postoje i vjetroagregati ultra velike snage i oni se vrlo često ugrađuju na pučini gdje je velik vjetro potencijal. [6]



Sl. 4.8. Vjetroelektrana na pučini u Walney-u, Engleska [17]

### 4.2.3 Podjela vjetroagregata prema vrsti generatora

Za proizvodnju električne enegije putem vjetroagregata,najčešće se koriste:

- 1.Asinkroni generatori,a oni se dijele na kavezne i na generatore s namotanim rotorom i kliznim kolotovima
- 2.Sinkroni generatori,a oni se dijele na generatore s namotanim rotorom i generatore s permanentnim magnetom
- 3.Ostali tipovi generatora,a to su,najčešće,visokonaponski generatori i generatori s poprečnim tokom [6]



Sl. 4.9. Generator s permanentnim magnetom namjenjen za vjetroagregat [18]

#### 4.2.4. Podjela vjetroagregata prema brzini vrtnje rotora

Prema brzini vrtnje rotora, vjetroagregati se mogu podijeliti u dvije skupine:

##### 1. Vjetroagregati sa kontinuiranom (stalnom) brzinom vrtnje rotora

Ovakvi vjetroagregati su se pojavili početkom 1990-ih godina i u upotrebi su još i danas. Njihovo glavno obilježje je da se rotor vrti uvijek istom brzinom, bez obzira na jakost puhanja vjetra. U sebi uvijek imaju ugrađene kondenzatorske baterije za kompenzaciju jalove snage, kao i soft starter preko kojih su priljučeni na elektroenergetski sustav. Brzina vrtnje rotora vjetrogeneratora ovisi o frekvenciji mreže i o prijenosnom omjeru prijenosnika. Gotovo pa uvijek imaju ugrađen asinkroni generator za proizvodnju električne energije zbog boljih svojstava i upravljanja. Nastoji se što bolje iskoristiti energiju vjetra za pokretanje vjetroturbine. Glavne prednosti ovakve izvedbe vjetroagregata su: robusnost samoga postrojenja, dobra iskoristivost energije vjetra i jednostavnost izvedbe i mogućnost lakog rješavanja mehaničkih kvarova. Mane ovakve izvedbe vjetroagregata su: nepouzdanost u kvalitetu električne energije, velika mehanička naprezanja i nemogućnost kontroliranja potrošnje jalove (reaktivne) snage. U slučaju da su kondenzatorske baterije i generator odvojeni od mreže, postoji mogućnost pojave prenaponskih uvjeta, što, može biti pogubno za instalacije oko samog vjetroagregata, kao i ostalih dijelova mreže. [6]

##### 2. Vjetroagregati s varijabilnom (promjenjivom) brzinom vrtnje rotora

U posljednje vrijeme sve se češće grade vjetroagregati s promjenjivom brzinom vrtnje rotora. Ovakav tip vjetroagregata proizvodi jednako kvalitetnu električnu energiju bez obzira na brzinu vrtnje rotora samog vjetroagregata. Kod ovakvog tipa vjetroagregata gotovo pa ni nema fluktuacija brzine vjetra jer se one kompenziraju promjenjivom brzinom vrtnje rotora. Također, na sami rotor nema jakih mehaničkih naprezanja kao kod vjetroagregata sa stalnom brzinom vrtnje. Mane ovakvog tipa vjetroagregata su: povećani gubici na sklopovima energetske elektronike, povećan broj posredničkih sklopova i komponenti što može dovesti do pada pouzdanosti u rad vjetroagregata, viša cijena i troškovi kako instalacije, tako i same izvedbe vjetroagregata. [6]

#### 4.2.5. Podjela vjetroagregata prema mjestu rada

Prema mjestu rada, vjetroagregati se mogu podijeliti na:

##### 1. Vjetroagregati instalirani na kopnu

Ovakav tip vjetroagregata primjenjuje se od davnina. Karakterizira ih jeftinija izvedba, dobra iskoristivost, dostupnost, jednostavnost itd. Najčešće su postavljeni na mjesta gdje, prema atlasu vjetra, postoji veliki vjetropotencijal. Prema tome, najbolje ih je postaviti u planinske i brdske predjele na lokacije gdje se vjetar naglo ubzava, a to su, najčešće, padine. Ako, kojim slučajem, sagradimo vjetroelektranu u nizine ili visoko na brdu, nećemo uspjeti iskoristiti većinu vjetropotencijala kojega imamo. Vjetroelektrana Danilo ima najveću instaliranu snagu u Hrvatskoj od 43,7 MW i nalazi se blizu Šibenika. Također, Republika Hrvatska raspolaže i s još nekoliko vjetroelektrana, a to su: Vjetroelektrana Vrataruša, Vjetroelektrana Rudine, Vjetroelektrana Bruška itd. [4]



Sl. 4.10. Primjer vjetroelektrane instalirane na kopnu [19]

## 2. Vjetroagregati instalirani na moru (pučini)

Zbog svojih brojnih prednosti, sve se više teži instaliranju vjetroagregata na morsku pučinu. Obično ovakvi vjetroagregati daju višu izlaznu snagu i rade veći broj sati u godini. Postavljanje vjetroagregata na pučini je znatno skuplje nego postavljanje vjetroagregata na kopno. Velika prednost u odnosu na vjetroagregate postavljene na kopno je to što buka ne predstavlja problem, kao što to nije slučaj sa vjetroagregatima postavljenima na kopnu. Ovakvi tipovi vjetroagregata moraju se postaviti na više stupove, a sami stupovi moraju imati platforme koje služe za držanje vjetroagregata. Generirana energija se prenosi putem podvodnih kablova do potrošača. Mana ovakvih izvedbi vjetroagregata je to što je potrebna dodatna zaštita od korozije zbog slane vode, kao i štitnici od teških udara morskih vjetrova što dovodi do povećane cijene održavanja samih vjetroagregata. Gotovo pa uvijek se vjetroagregati postavljaju u pravokutan oblik kako bi se što bolje iskoristila energija vjetra. Smatra se da su vjetroelektrane na pučini budućnost elektroenergetike. Svjetski prvaci u proizvodnji električne energije iz vjetroelektrana na moru su: Ujedinjeno Kraljevstvo, Kina i Njemačka. [20]



Sl. 4.11. Vjetroturbinе na pučini u Njemačkoj [20]

### 4.3. Optimalno mjesto postavljanja vjetroagregata

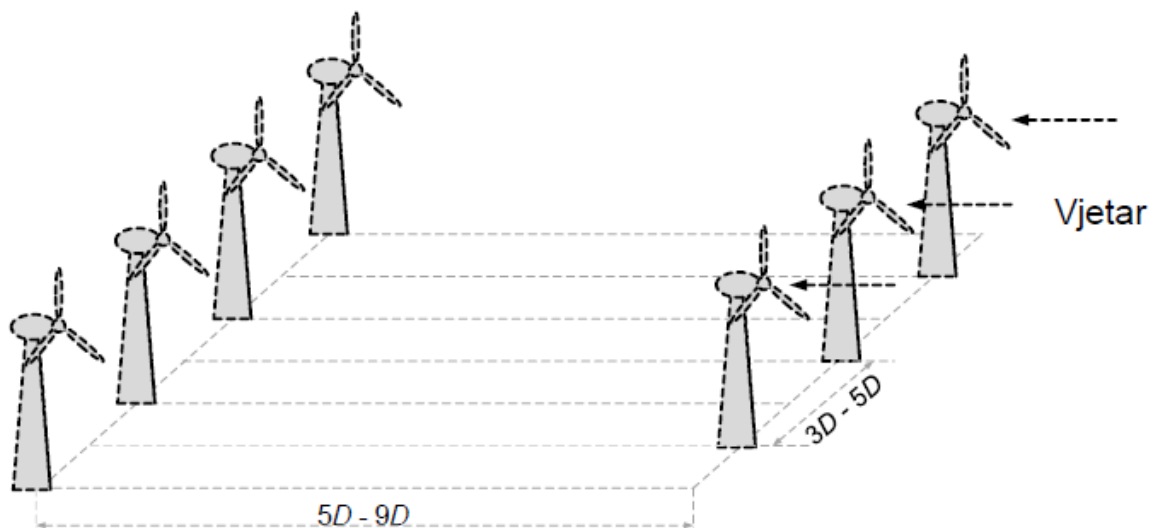
Kako je i prije ukazano, reljef Zemlje utječe na brzinu, smjer i jakost puhanja vjetra. U skladu s time, potrebno je odabrati povoljno mjesto postavljanja samih vjetroagregata. Najveći problem kod vjetroelektrana je tzv. efekt međusobnog zaklanjanja koji je uvijek prisutan u radu vjetroelektrana. Njega je gotovo pa nemoguće izbjeći, ali se mogu poduzeti neke određene mjere i pripaziti na smještaj samih vjetroagregata unutar vjetroelektrane. [6] Vjetroagregati se individualno postavljaju u redove unutar vjetroelektrane. Vjetroagregati u prvom redu „dobijaju“ vjetar sa najmanje turbulencija i sa najvećom brzinom strujanja i oni utječu na ostale vjetroagregati u redovima iza njih. Pa tako vjetar koji je prošao kroz agregate u prvim redovima stiže do vjetroagregata u ostalim redovima, ali ima puno više turbulencija i gubi na snazi puhanja što dovodi do toga da vjetroagregati u zadnjim redovima gotovo pa i nemaju dovoljnu snagu vjetra za pokretanje. Samim time se gubi i na korisnosti cijelog procesa pretvorbe energije čineći investiciju gradnje i instalacije vjetroelektrana neisplativom. Međutim, učinak međusobnog zaklanjanja se može reducirati na način da se udalje vjetroagregati, tj. da se vjetar može „oporaviti“ dok dođe do sljedećeg vjetroagregata. Na slici 4.12. može se vidjeti efekt zaklanjanja kod vjetroelektrane. [21]



Sl. 4.12. Efekt međusobnog zaklanjanja (zavjetrine) [21]



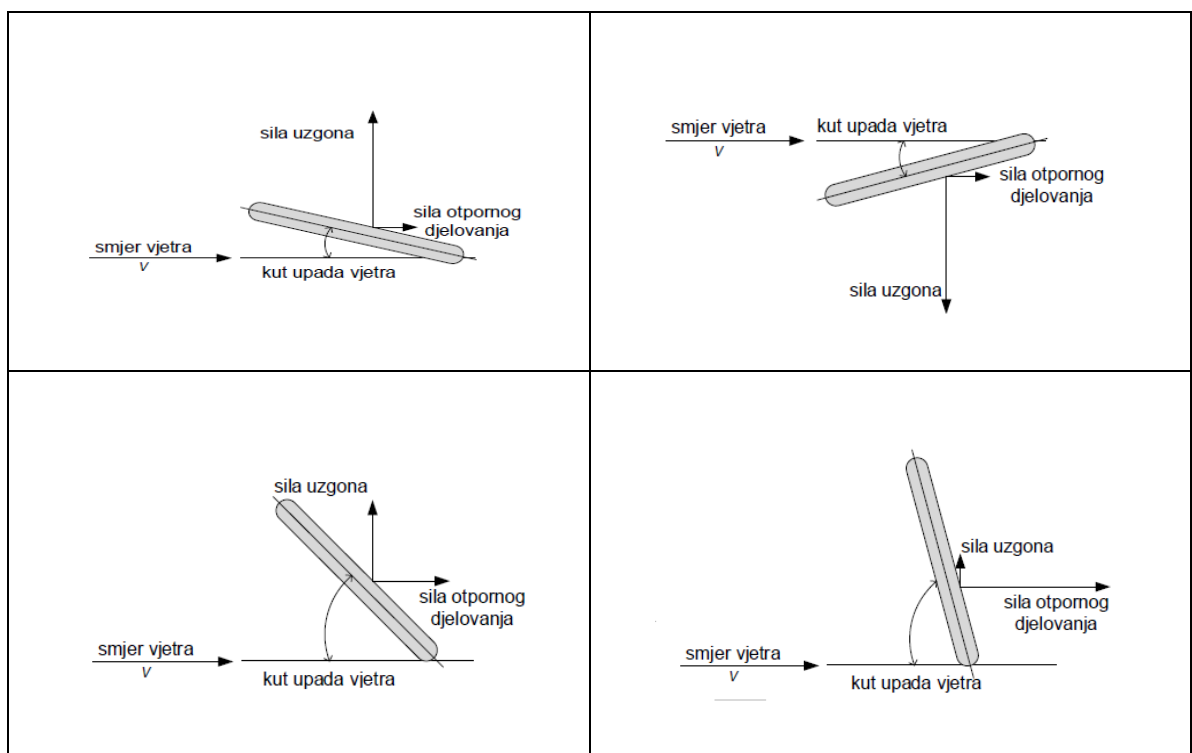
Ukoliko se ipak postavljaju vjetroagregati na što veće udaljenosti, to može prouzrokovati potrebu za većim zemljištem što može biti vrlo skupo i neisplativo. Stoga se mora pronaći odgovarajući, ekonomski isplativiji način iskorištenja zemljišta i same energije vjetra. Zbog efekta zavjetrine se mogu izgubiti od 2 do čak 20 % energije koja bi se mogla proizvesti u idealnom slučaju da nema toga efekta. Iz iskustvenih rješenja i proračuna najbolje iskoristivosti energije vjetra, vjetroagregati se u vjetroelektrani postavljaju pravokutno kako bi utjecaj učinka zavjetrine bio što manji i kako bi se iskoristilo što više energije vjetra. Na pučini je uobičajeno da se vjetroagregati postavljaju na što veće udaljenosti jer samo nema problema sa iskorištenjem zemljišta. Također, na pučini je vjetar tijekom dana konstantan jer nema nikakvih prepreka koje bi ga usporavale ili stvarale turbulencije u radu. U praksi se često vjetroagregati postavljaju na od 3 do 5 udaljenosti dužine promjera turbine, dok se u redove postavljaju na oko 5 do 9 dužina promjera turbine kao što možemo vidjeti na slici 4.13. [6]



Sl. 4.13. Najpovoljnije rastojanje vjetroagregata [6]

#### 4.4. Aerodinamika lopatica turbine

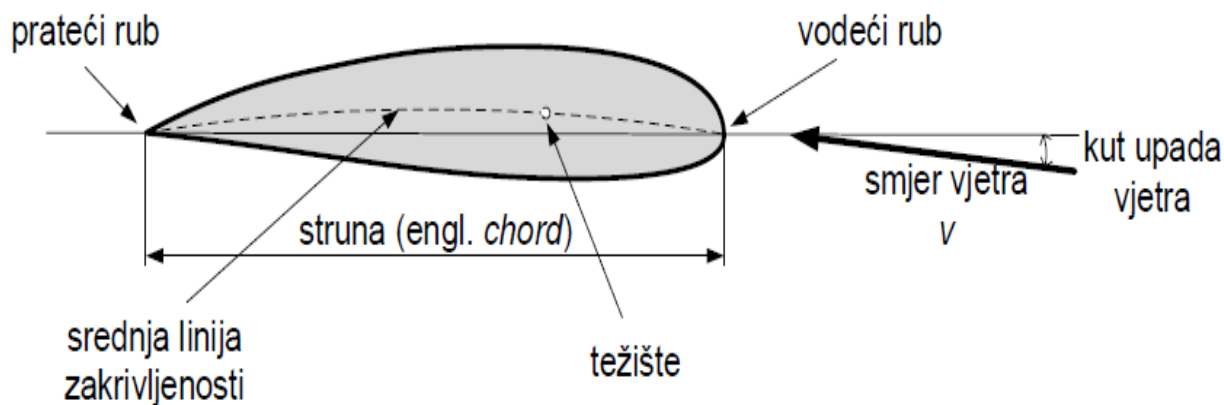
U radu vjetroagregata, na lopaticice vjetroturbine djeluju dvije sile, a to su: sila uzgona i sila otpora zraka. Te dvije sile su međusobno okomite. Sila otpora zraka ima smjer puhanja vjetra, a sila uzgona je sila koja djeluje okomito od smjera strujanja vjetra. Aerodinamička svojstva lopatica vjetroturbine je vrlo slična aerodinamičkim svojstvima krila aviona. Vrlo je bitno postići što bolja aerodinamička svojstva lopatica vjetroturbine kako bi energija vjetra bila što bolje iskorištena tj. da bismo imali što bolju korisnost i što manje troškove izrade vjetroturbine. U tablici 4.1. možemo vidjeti odnose sile uzgona i sile otpornog djelovanja zraka na lopaticu turbine. [6]



Tablica 4.1. Odnosi sile uzgona i sile otpornog djelovanja zraka na lopaticu turbine [6]

Regulacija snage i brzine okretanja vjetroturbine se vrši namještanjem upadnog kuta puhanja vjetra tj. kuta između sile uzgona i sile otpornog djelovanja zraka na lopaticu turbine. [6] Rezultantna sila sile uzgona i sile otpornog djelovanja zraka je, u suštini, sila koja djeluje na lopaticu vjetroturbine i koja pokreće istu. Iz tablice 4.1. možemo vidjeti da ukoliko mijenjamo upadni kut brzine vjetra, razmjerno s time se mijenja sila otpornog djelovanja zraka, a sila uzgona obrnuto proporcionalno. [6]

Na slici 4.14. mogu se vidjeti osnovni dijelovi lopatice vjetroturbine kao i njezina aerodinamička obilježja kroz poprečni presjek lopatice. [6]



Slika 4.14. Dijelovi lopatice i njezina aerodinamička svojstva [6]

Kako bi ostvarili što bolja aerodinamička svojstva i kako bi imali što manje gubitaka vjetroenergije, potrebno je zadovoljiti nekoliko uvjeta, a to su:

1. Vodeći rub lopatice turbine treba biti zaobljen
2. Prateći rub lopatice turbine treba biti vrlo oštar
3. Površina lopatice treba biti što glađa
4. Omjer sile uzgona i otpornog djelovanja zraka treba biti što veći [6]

## 5. USPOREDBA TRENUTNIH MALIH VJETROAGREGATA

### 5.1. Primjena malih vjetroagregata u kućanstvima

Vjetroagregati se mogu spojiti na distribucijsku mrežu koja potrošaču omogućuje korištenje električne energije iz obnovljivih izvora. Vjetroagregat, koji je instaliran na mrežu, uvelike može reducirati potrošnju električne energije koja se koristi za rasvjetu, grijanje i ostale aktivnosti i uređaje. Ukoliko vjetroagregat nije u mogućnosti proizvesti dovoljnu količinu električne energije za potrebe kućanstva, nastaje razlika između potrošnja iz različitih izvora. Ukoliko vjetroagregat proizvodi više električne energije od potrebe kućanstva, tada se ta energija može prodati, odnosno isporučiti drugim potrošačima. Velike se prednosti korištenja sustava vjetroagregata spojenih na mrežu, a posebno dobre pogodnosti za njihovu instalaciju su ako potrošač obitava na područjima sa prosječnom godišnjom brzinom vjetra od 4,5 m/s, ako je distribucija energije vrlo skupa ili ako su potrošaču ponuđeni vrlo dobri poticaji za otkup viška energije i/ili kupovinu vjetroagregata. Prije kupnje vjetroagregata, trebalo bi kontaktirati distributera električne energije kako bi se utvrdili i razjasnili određeni zahtjevi i riješile eventualne nejasnoće oko kvalitete električne energije. Također, koriste se sustavi za mjerenje neto količine energije (engl. net metering) koji služe za otkup i regulaciju električne energije potrošača kao i samog trgovanja energijom. Uz to, postoje i tzv. hibridni sustavi i napajanja. Takvi sustavi kombiniraju vjetroagregate i solarne kolektore. Oni su izuzetno pogodni za područja u kojima nema dovoljno Sunčevog zračenja niti dovoljne brzine vjetra tijekom cijele godine. Vjetroagregati i solarni paneli mogu raditi u isto vrijeme, ali mogu raditi nasumično ovisno o vremenskim uvjetima i dobu godine. Ukoliko se dogodi da ne mogu raditi niti vjetroagregati niti solarni paneli, energija se može nadomjestiti uz pomoć generatora na tekuća i plinovita goriva. Hibridni sustavi najčešće imaju regulatore koji automatski upravljaju cijelim sustavom i osiguravaju pravilan rad cijeloga sustava.

[22]

## **5.2. Vjetroagregati – trenutno stanje tržišta**

Kupovina vjetroagregata uvelike ovisi o zahtjevima kupca. Vrlo je važno znati je li sustav izravno povezan na mrežu, kompletno neovisan ili je u kombinaciji. Na osnovu ovih saznanja o stanju sustava kupac bira odgovarajući vjetroagregat. Komponente koje će biti svakako potrebne za pravilno funkcioniranje vjetroagregata su : regulator, razni baterijski spremnici energije, ožičenje, izmjenjivač napona, sigurnosna sklopka za isključivanje u slučaju kvara i zaštitno uzemljenje. U nastavku ovoga rada može se vidjeti trenutni pregled tržišta vjetroagregata. [23]

### **5.2.1. Vjetroturbine s tri lopatice**

- Nature Power 70701 Wind Turbine-2,000 Watt

Ovakav tip turbine je izuzetno pogodan ukoliko korisnik vjetroturbine živi u vrlo vlažnim i vjetrovitim područjima. Ova turbina ima tri lopatice od karbonskih vlakana i tijelo napravljeno od aluminija. Također, dobra strana ove turbine jest da posjeduje zaštitu od prejakog vjetra kako ne bi došlo do oštećenja lopatica. Ova turbina vrlo je prikladna za punjenje akumulatorskih baterija od 24 V, a može se primjenjivati na kopnu kao i na morskoj pučini. Najčešće primjena ove turbine je rad izvan mreže. Poprilično je dobra za vjetrovita područja jer ima brzina vjetra koja je potrebna za pokretanje rotora turbine jest oko 3 m/s. Vrlo je jednostvna za sastavljanje i instalaciju jer se sastoji od samo 5 dijelova. Velika prednost ove turbine je tihi rad i laka instalacija, ali velika mana joj je visoka cijena. Glavni dio ove turbine je trofazni sinkroni generator koji dolazi uz izmjenjivač, stoga je ova turbina dovoljna za proizvodnju energije za jedno manje kućanstvo. Ovaj model turbine ima jednu inačicu, a to je da se može koristiti i kao turbina za proizvodnju energije na brodu. Vrlo je lagana i praktična. Važno je napomenuti da ova vjetroturbina ima jednogodišnje jamstvo. Ukoliko kupac nije zadovoljan sa radom i performansama ove vjetroturbine, može ju vratiti u roku od 180 dana. [24]



Sl. 5.1. Vjetroturbina Nature Power 70701 [24]

- Automaxx Windmill 1500 W 24 V 60 A Wind Turbine Generator Kit

Ovo je izuzetno popularan model vjetroturbine. Tvrtka Automaxx nudi svojim kupcima modele od 1200 W i od 1500 W. Također, tvrtka nudi vrlo snažne modele vjetroagregata za udaljena mjesta. Ovaj model zahtjeva vrlo vrlo snažan toranj postavljen na vrlo prikladnom mjestu gdje uvijek tijekom godine ima vjetra. Postavljanje i instalacija ovog vjetroagregata može biti izuzetno izazovna. Lopatice ove turbine je sačinjen od staklenih vlakana i polipropilena koji je vrlo otporan na sve vremenske uvjete. Ova turbina posjeduje vrlo pouzdan sustav kočnja protiv jakih udara vjetrova. Ovaj komplet posjeduje jednogodišnje jamstvo. [23]

Nazivna snaga	1500 W
Istosmjerni napon	24 V
Broj lopatica	3
Nazivna brzina vjetra	14 m/s
Promjer rotora	1,7 m
Masa	15 kg
Proizvodni materijal	Polipropilen i staklena vlakna

Tablica 5.1. Specifikacije turbine Automaxx Windmill 1500 W [23]



Sl. 5.2. Automaxx Windmill 1500 W 24 V 60 A [23]

### 5.2.2. Vjetroturbine s pet lopatica

- Dyna-Living 500 W vjetroturbina

Za ovaj model vjetroturbine može se reći da je jedan od modernijih. Pruža izuzetno učinkovit rad bez buke. Lopatice su izrađene od raznih bakrenih umetaka koji su izuzetno otporni na koroziju, visoku temperaturu, vlagu i ne deformiraju se lako. Uz to, lopatice turbine su poprilično aerodinamične tako da se energija vjetra iskorištava na najbolji mogući način. Ono što ovaj model čini izuzetno modernim je vrlo dobra regulacija napona i struje te visok faktor korisnosti. Ovaj model vjetroturbine može se primjeniti za punjenje akumulatorskih baterija, proizvodnju energije za osvjetljenje čamaca, brodova, kamp kućica itd. [23]

Nazivna snaga	500 W
Istosmjerni napon	12 V
Broj lopatica	5
Nazivna brzina vjetra	13 m/s
Promjer rotora	1,3 m
Masa	7,28 kg
Proizvodni materijal	Najlonska vlakna

Tablica 5.2. Specifikacije vjetroturbine Dyna-Living 500 [23]



Sl. 5.3. Vjetroturbina Dyna-Living 500 W [23]



- Windmax HY400 500 W Residential Kit vjetroturbina

Komplet Windmax HY400 500 W Residential Kit izuzetno je dobar i povoljan ukoliko korisnik želi napajati par uređaja, ali ne i cijelu kuću. Proizvođač preporučuje korištenje nekoliko ovakvih vjetroturbina ako kupac želi napajati cijeli dom ili korištenje vjetroturbine u kombinaciji sa solarnim panelima. Turbina posjeduje lopatice koje su napravljene od najlona i dodatno ojačane vlaknima od stakla. Brzina vjetra potrebna da se rotor vjetroturbine počne kretati je oko 2.5 m/s, a brzina vjetra pri kojoj vjetroturbina proizvodi najviše snage jest oko 12 m/s. Također, turbina posjeduje modernu elektromagnetsku kontrolu brzine što ju čini izuzetno povoljnom za korištenje u vrlo vjetrovitim područjima sa brzinama vjetra preko 26 m/s. Kao što je već ranije rečeno, može se koristiti i u kombinaciji sa solarnim panelima što još dodatno povećava korisnost ovoga sustava, a tada izlazna snaga može prelaziti i preko 600 W. Ova vjetroturbina vrlo je pouzdana i tiha, ali ne bi trebalo očekivati veliku proizvodnju od nje. Lako se održava i ima vrlo moderan dizajn. [24]

Nazivna snaga	500 W
Napon	12 V
Brzina pokretanja	2,5 m/s
Nazivna brzina vjetra	12 m/s
Maksimalna brzina vjetra	26 m/s
Promjer rotora	1,55 m

Tablica 5.3. Specifikacije vjetroturbine Windmax HY400 500 W [24]



Sl. 5.4. Vjetroturbina Windmax HY400 500 W [24]

### 5.2.3. Vjetroturbine s jedanaest lopatica

- 2000 W Missouri general Freedom II 11 Blade vjetroturbina

Ovaj je model dostupan u više varijanata, ali najčešće se koristi ovaj koji ima nazivnu snagu 2000 W. Model s jedanaest lopatica je namjenjen proizvodnji električne energije za cijeli dom. Projektirala ju je američka tvrtka Missouri Wind and Solar i daje garanciju od 50 godina za nesmetan rad. Model s jedanaest lopatica idealan je za okruženja s nižom brzinom vjetra jer maksimalnu snagu postiže već pri brzini vjetra od 7 m/s. Svi metalni dijelovi ove turbine su pocinčani, što znači da su otporni na koroziju i ne zahtjevaju dodatne boje niti premaze. Lopatice su načinjene od ugljičnih vlakana, pocinčane su i imaju dugačak životni vijek pri normalnoj uporabi cijele vjetroturbine. Unutar male lađe se nalazi tzv. PMG generator koji sadrži puno bakra. U suštini, to je generator s trajnim magnetom i ima zakrivljenu jezgru statora za lakše pokretanje. S ovim tipom generatora može se postići snaga od oko 2000 W. [24]



Sl. 5.5. Vjetroturbina 2000 W Missouri general Freedom II 11 Blade [24]

#### 5.2.4. Vjetroturbine s vertikalnom osi vrtnje

- Happybuy 600 W vjetroturbina

Happybuy 600 W vjetroturbina je vrlo pogodna za rad u uvjetima vrlo slaboga vjetra. Potrebna brzina vjetra na kojoj turbina proizvodi energiju je oko 2 m/s. Ima vrlo dobar dizajn lopatica koje su otporne na koroziju i na UV zračenje. Može se koristiti u urbanim i u vrlo zabačenim sredinama jer se lako uklapa u bilo koji ambijent npr. u dvorište ili na krov kuće/zgrade. Ugrađen joj je automatski kočni sustav koji trenutno reagira na vrlo jako udare vjetra koji bi mogli dovesti do oštećenja vjetroturbine. [23]

Nazivna snaga	600 W
Istosmjerni napon	12 V
Broj lopatica	5
Nazivna brzina vjetra	12 m/s
Promjer rotora	0,9 m
Masa turbine	12 kg
Proizvodni materijal	Najlonska vlakna

Tablica 5.4. Specifikacije turbine Happybuy 600 W [23]



Sl. 5.6. Vjetroturbina Happybuy 600 W [23]

- Tumo-Int 400 W vertikalna vjetroturbina s regulatorom

Ovaj model vjetroturbine je jako popularan među korisnicima. Iako naočigled vrlo moderno i lijepo izgleda, nije kompatibilan za veliku proizvodnju električne energije. Općenito, velika prednost turbina s vertikalnom osi vrtnje je da ne zahtjevaju zakretanje glave prema vjetru. Generator ove vjetroturbine koristi permanentni magnet, kao i kod većine ostalih. Ima vrlo malu startnu brzinu vjetra pa je vrlo dobra za instalaciju u područja s malom prosječnom godišnjom brzinom vjetra. Turbina se kupuje zajedno s regulatorom napona i struje, ali se ostali bitni dijelovi moraju kupiti zasebno, što je ujedino i velika mana ove vjetroturbine. [23]

Nazivna snaga	400 W
Istosmjerni napon	24 V
Nazivna brzina vjetra	11 m/s
Promjer rotora	1,4 m
Masa turbine	26 kg
Proizvodni materijal	Lijevene aluminijske slitine

Tablica 5.5. Specifikacije vjetroturbine Tumo-Int 400 W [23]

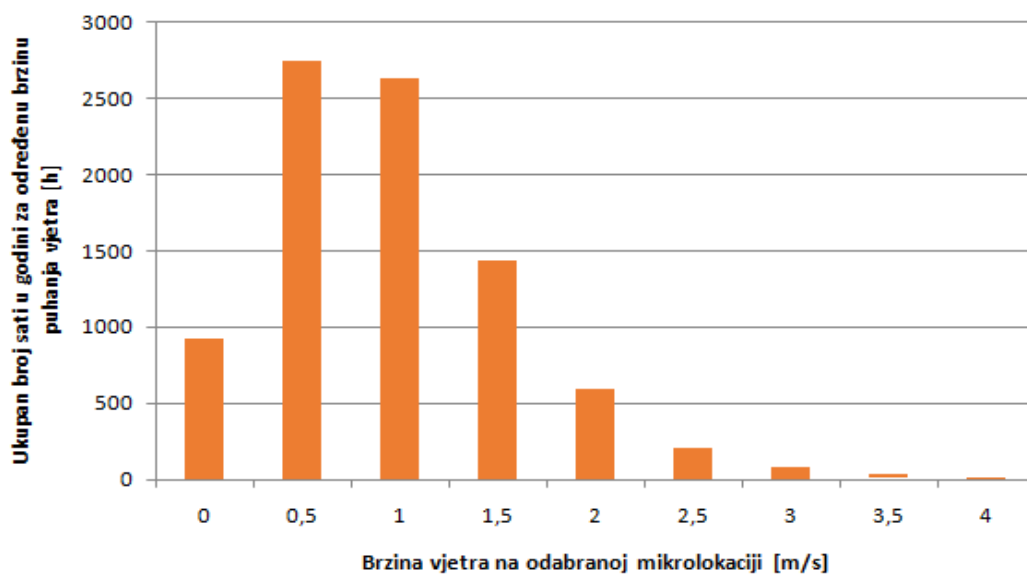


Sl. 5.7. Vjetroturbina Tumo-Int 400 W [23]

### **5.3. Proračun očekivane proizvodnje električne energije malih vjetroagregata na različitim mikrolokacijama**

Kao što je pokazano i spomenuto u radu, na svjetskom tržištu ima mnogo vrsta i modela vjetroagregata. U praktičnom dijelu rada pokazat će se i usporediti očekivane proizvodnje električne energije na dvije različite lokacije pomoću dva različita vjetroagregata. Odabrani su mali vjetroagregati različitih nazivnih snaga, dimenzija i pravca osi vrtnje koje smo „postavili“ na lokaciju A i lokaciju B. Opisi i obilježja malih vjetroagregata koje smo odabrali kao i obilježja odabranih mikrolokacija nalaze se u nastavku rada.

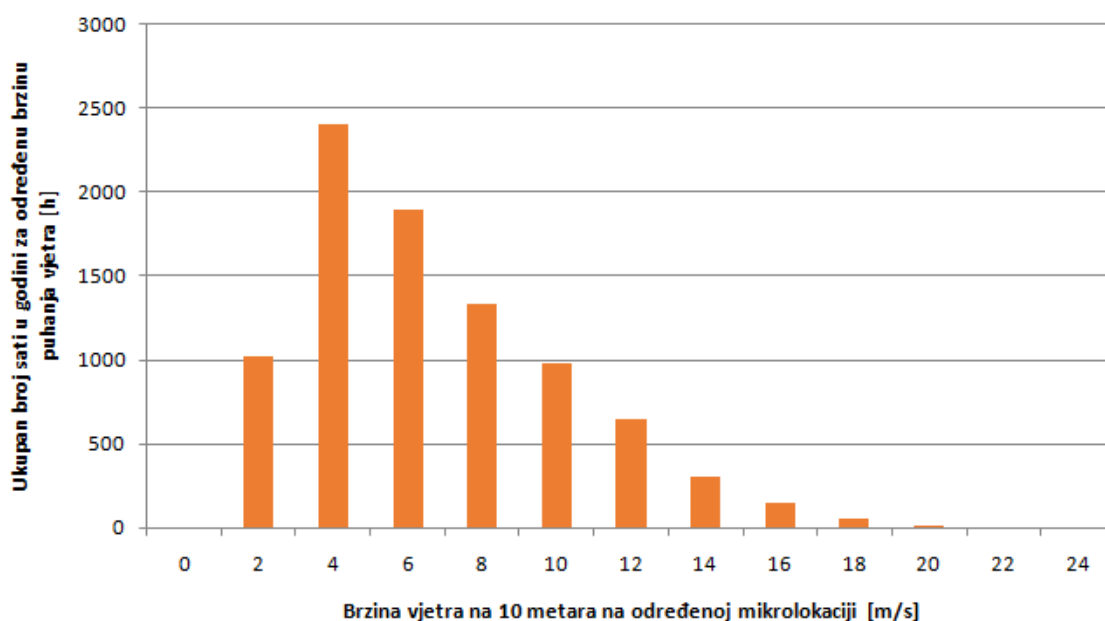
Na slici 5.8. nalazi se brzine puhanja vjetra, na mikrolokaciji A, s pripadnim brojem sati godišnje. Mikrolokacija A koristi mjerenja na krovu zgrade FERIT-a u Ulici kneza Trpimira u Osijeku.



Sl. 5.8. Brzina i broj sati puhanja vjetra kroz godinu na mikrolokaciji A

Iz grafičkog prikaza zaključuje se da kroz godinu ima vrlo malo vjetra brzine iznad 3 m/s. Vjetar iznad 3 m/s uglavnom puše u naletima.

Također, izračuni su se vršili i za mikrolokaciju B koja predstavlja lokaciju s većim potencijalom energije vjetra od lokacije A. Na slici 5.9. mogu se vidjeti brzine puhanja vjetra, na mikrolokaciji B, s pripadnim brojem sati godišnje.



Sl. 5.9. Brzina i broj sati puhanja vjetra kroz godinu na mikrolokaciji B

Iz grafa se zaključuje da najveći broj sati godišnje vjetar puše brzinom od 4 do 8 m/s.

U nastavku slijedi opis i specifikacije malih vjetroagregata koji su korišteni za usporedbu očekivanih godišnjih proizvodnja električne energije na opisanim mikrolokacijama.

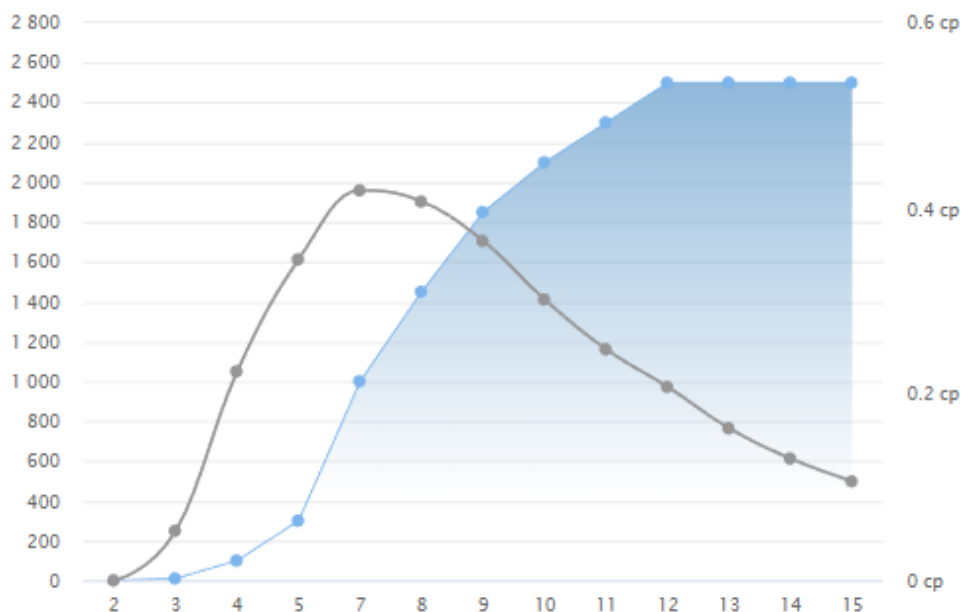
- Enair 30Pro

Ovaj mali vjetroagregat s horizontalnom osi vrtnje je sposoban proizvoditi dovoljno električne energije za potrebe jednoga kućanstva na dan, pogotovo za mikrolokacije sa malom brzinom vjetra kroz godinu. Ovaj mali vjetroagregat s tri lopatice ima masu od 125 kilograma i nazivne je snage od 3000 W. Startna brzina vjetra pri kojoj se rotor počinje okretati je 2 m/s. Podržava brzine vjetra od 2 m/s do 60 m/s. [25]

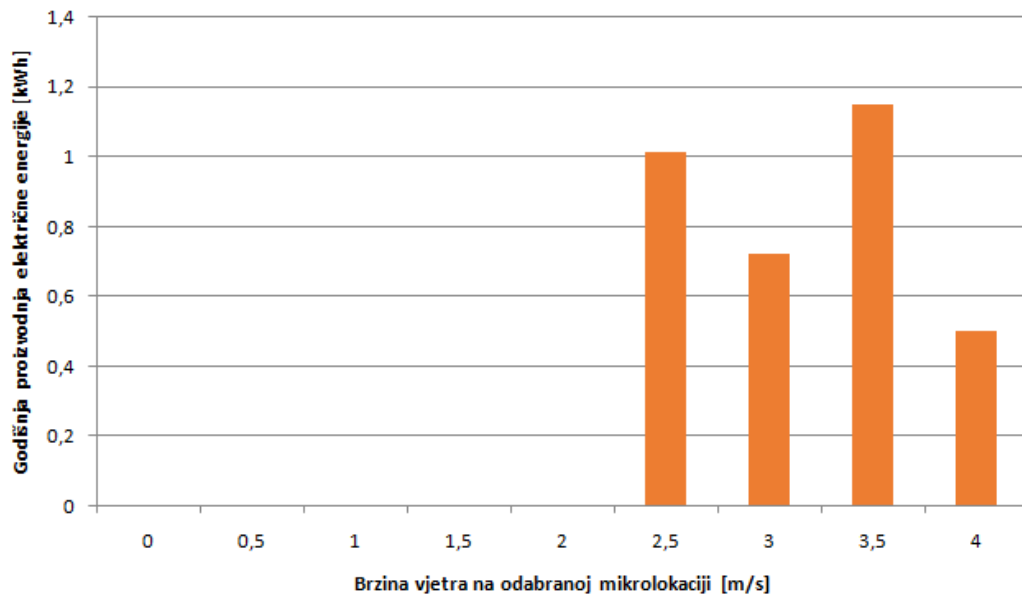


Sl. 5.10. Mali vjetroagregat Enair 30Pro [26]

Karakteristika snage u ovisnosti o brzini vjetra je prikazana na slici 5.11. [25]

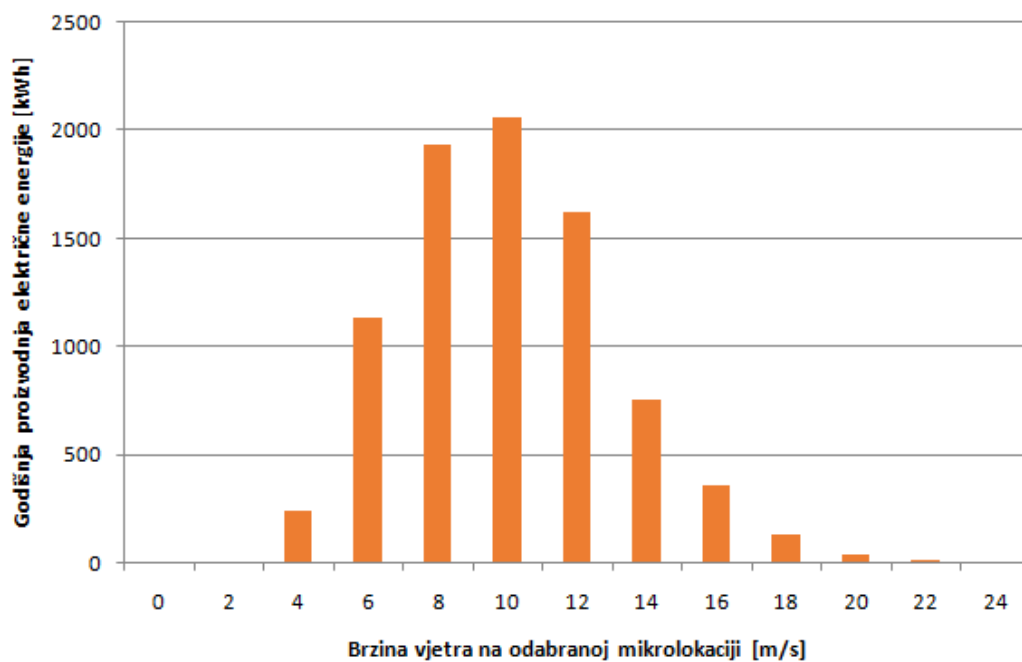


Sl. 5.11. Ovisnost vjetroagregata Enair 30Pro o brzini puhanja vjetra (plava krivulja) [25]



Sl. 5.12. Godišnja proizvodnja električne energije Enair 30Pro na mikrolokaciji A

Na slici 5.12. može se zaključiti da mali vjetroagregat Enair 30Pro nije isplativo stavljati na mikrolokaciju A jer brzina vjetra kroz godinu vrlo rijetko prelazi 3 m/s, što nije dovoljno da vjetroagregat radi nazivnom snagom.



Sl. 5.13. Godišnja proizvodnja električne energije Enair 30Pro na mikrolokaciji B

Iz grafa na slici 5.13. može se zaključiti da ovaj vjetroagregat također nije isplativo koristiti na mikrolokaciji B jer jako malo sati u godini brzina vjetra prelazi 12 m/s.



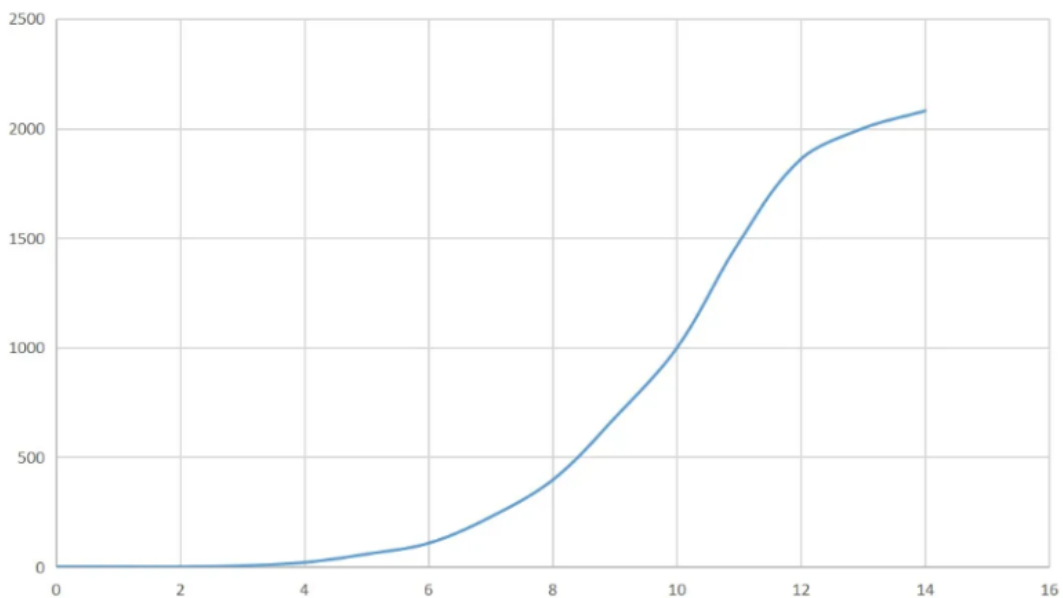
- FX-2000 W Vertical Axis Wind Turbine

Ovaj model malog vjetroagregata s vertikalnom osi vrtnje rotora ima startnu brzinu od 3 m/s i nazivna mu je snaga 2000 W, a može ići i do 2050 W. Ima masu manju od 180 kg i lako se prilagođava svim uvjetima rada. U slučaju brzine vjetra jače od 40 m/s, proradit će elektromagnetska kočnica koja će spriječiti uništenje vjetroagregata. [27]

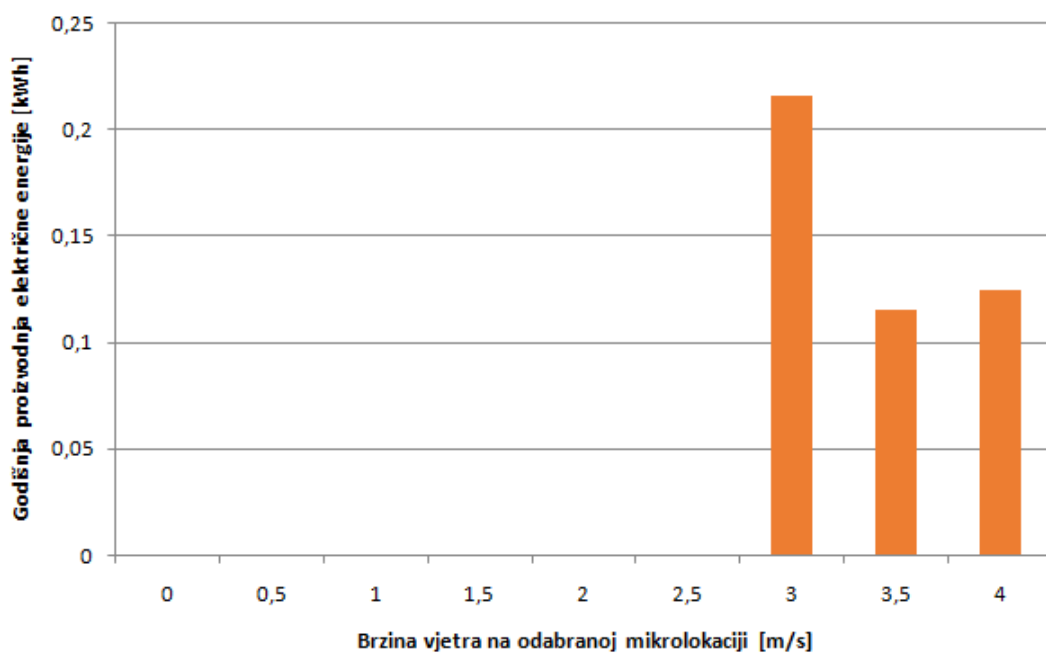


Sl. 5.14. Vjetroagregat FX-2000 W [28]

Karakteristika snage u ovisnosti o brzini vjetra je prikazana na slici 5.15. [27]

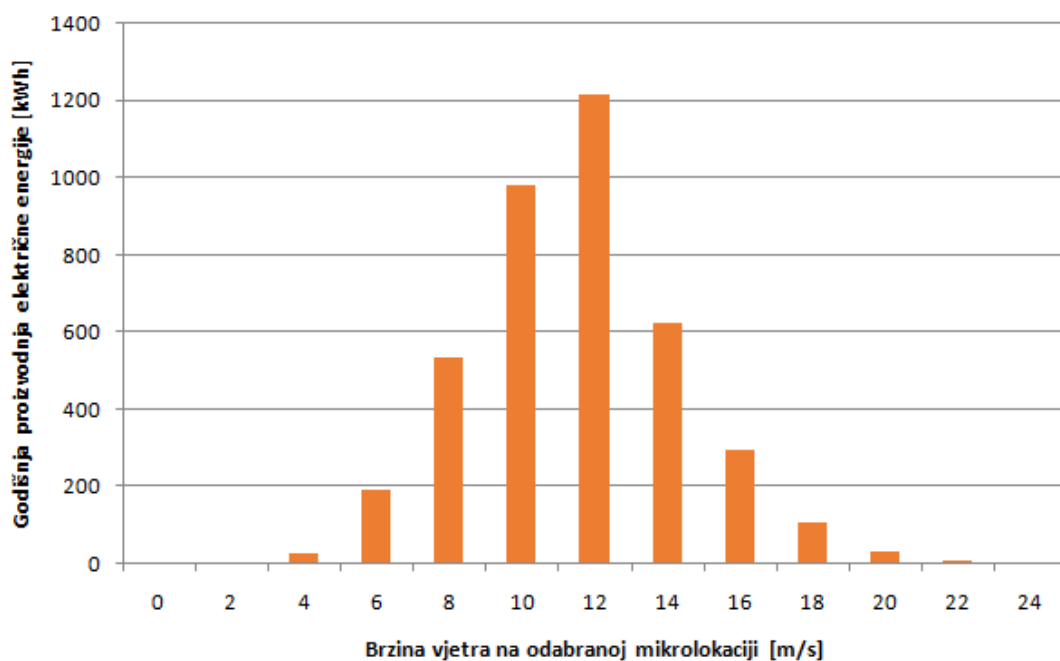


Sl. 5.15. Ovisnost vjetroagregata FX-2000 W o brzini puhanja vjetra [27]



Sl. 5.16. Godišnja proizvodnja električne energije FX-2000 W na mikrolokaciji A

Iz priloženoga grafa na slici 5.16. može se zaključiti da je neisplativo instalirati FX-2000 W na promatranj mikrolokaciji A jer gotovo pa nikada brzina vjetra ne prelazi 10 m/s što je dovoljno za rad vjetroagregata na nazivnoj snazi.



Sl. 5.17. Godišnja proizvodnja električne energije FX-2000 W na mikrolokaciji B

Iz grafa na slici 5.17. se može zaključiti da instaliranje ove vjetroturbine graniči s isplativošću jer ona postiže nazivnu snagu na brzini vjetra između 12 m/s i 14 m/s što se može vidjeti na slici 5.15. Ukoliko se vjetroagregat instalira na promatranu mikrolokaciju B, godišnja proizvodnja električne energije ovisit će o obilježjima godine, odnosno o lokalnim vremenskim uvjetima.

Krivulje proizvodnje električne energije za oba mala vjetroagregata na mikrolokaciji A su vrlo slične, što dovodi do zaključka da mikrolokacija A nema povoljan potencijal energije vjetra za proizvodnju tijekom cijele godine.

Što se tiče mikrolokacije B, može se zaključiti da isplativost instaliranja i proizvodnja električne energije prvenstveno ovisi o vremenskim uvjetima za tekuću godinu. Kako bi se dobili što precizniji podaci o satima puhanja vjetra na bilo kojoj lokaciji, potrebno je provoditi mjerenja barem 10 godina.

## 6. ZAKLJUČAK

Radeći ovaj rad, mogu zaključiti da iskorištavanje energije vjetra ima vrlo bogatu povijest i nadam se da će imati svjetlu budućnost. Pošto je energija vjetra vrlo čist i nadasve besplatan oblik energije, ljudi su kroz prošlost tražili odgovarajuće načine za njezino iskorištavanje. Ljudi su još od antičkih vremena spoznali dobrobiti energije vjetra za mljevenje žitarica i crpenje vode, što je olakšavalo mukotrpan rad. No, dolazi do velikog napredovanja tehnologije, stoga su se otkrile neke nove vrline vjetroenergije. Početkom 21. stoljeća povećala se bojazan od globalnog zatopljenja i njegova utjecaja na biljni i životinjski svijet, stoga sve više i više se koriste obnovljivi izvori energije i nije upitno jesu li obnovljivi izvori energije izvori energije budućnosti. U ovome radu, prikazane su i neke najnovije tehnologije izrade i specifikacije vjetroagregata na trenutnome tržištu. Rekao bih da je svaki vjetroagregat izuzetno kvalitetan, ukoliko se koristi u uvjetima za koje je namjenjen. Veliku ulogu u odabiru vjetroagregata ima i cijena koja je, katkad, i presudna kod kupovine vjetroagregata. Usporedbom specifikacija raznih vjetroagregata došao sam do zaključka da ne možemo striktno reći koji je vjetroagregat najbolji, nego bi trebali napraviti određene pokuse u odgovarajućim uvjetima. Nadalje, trebali bismo imati u vidu lakoću instaliranja vjetroagregata kao i prikladnu organizaciju transporta dijelova vjetroagregata. Ciljevi energetičara su što više smanjiti koncentraciju stakleničkih plinova u atmosferi, ostvariti što veću upotrebu obnovljivih izvora energije i što manju upotrebu neobnovljivih izvora energije. Upotreba vjetroagregata je sjajna ideja za ostvarivanje takvih ciljeva.

U praktičnome dijelu rada su napravljene usporedbe očekivanih godišnjih proizvodnja različitih vjetroagregata za različitim mikrolokacijama. Došao sam do zaključka da se ne isplati instalirati takve vjetroagregate na mikrolokaciju A zbog toga što tijekom godine ne toj mikrolokaciji nema brzina većih od barem 10 m/s. Što se mikrolokacije B tiče, vjetroagregat veće instalirane snage se ne isplati tamo postavljati zbog nedovoljnog broja sati u kojima vjetar tijekom godine puše brzinama od 8 m/s do 10 m/s. Ukoliko pak želimo postaviti vjetroagregat za male potrebe na tu mikrolokaciju, preporuča se vjetroagregat manje nazivne snage, a proizvodnja električne energije uvelike ovisi o vremenskim uvjetima tijekom godine te su potrebna dodatna razmatranja brzine puhanja vjetra tijekom dužeg vremenskog perioda.

## LITERATURA

- [1] M. Saad, Comparison of Horizontal Axis Wind Turbines and Vertical Axis Wind Turbines, IOSR Journal of Engineering, Kolovoz 2014, sv. 04, br. 08, str. 27-30, dostupno na linku: [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) [pristup ostvaren 29.06.2022.]
- [2] 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, Lipanj 2012., br. 6, sv. 3, str. 895-904, dostupno na linku: [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) [pristup ostvaren 29.06.2022.]
- [3] O. Kiyomiya, T. Rikiji, Pieter H.A.J.M. van GELDER, Dynamic Response Analysis of Onshore Wind Energy Power Units during Earthquakes and Wind, International Offshore and Polar Engineering Conference, Svibanj 2002., str. 520-526, dostupno na linku: [https://www.researchgate.net/publication/250321836\\_Dynamic\\_Response\\_Analysis\\_of\\_Onshore\\_Wind\\_Energy\\_Power\\_Units\\_during\\_Earthquakes\\_and\\_Wind](https://www.researchgate.net/publication/250321836_Dynamic_Response_Analysis_of_Onshore_Wind_Energy_Power_Units_during_Earthquakes_and_Wind) [pristup ostvaren 29.06.2022.]
- [4] W. Tong, Wind Power Generation and Wind Turbine Design, WIT Press, Southampton, 2010.
- [5] <https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/15d4d23d-ffb4-4d95-af9a-fd8dec8f9156/planetarna-cirkulacija-i-planetarni-vjetrovi.html> [pristup ostvaren 12.06.2022.]
- [6] D. Šljivac, D. Topić, Obnovljivi izvori električne energije, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, 2018.
- [7] Beaufortova ljestvica, dostupno na linku: <https://www.nautica-portal.com/nautica-portal-com/vijesti/1930-savjet-nautarima-kako-predvidjeti-promjenu-vremena-na-moru> [pristup ostvaren 13.06.2022.]
- [8] Ruža vjetrova za Split-Marjan, dostupno na linku: <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=53812> [pristup ostvaren 13.06.2022.]
- [9] Atlas vjetrova Republike Hrvatske, dostupno na linku : [https://meteo.hr/klima.php?section=klima\\_hrvatska&param=k1\\_8](https://meteo.hr/klima.php?section=klima_hrvatska&param=k1_8) [pristup ostvaren 13.06.2022.]
- [10] Renewable energy sources, The history of wind turbines, dostupno na linku: <https://www.renewableenergyhub.co.uk/main/wind-turbines/history-of-wind-turbines/> [pristup ostvaren 13.06.2022.]
- [11] Harnessing the winds, Professor James Blyth, dostupno na linku: <https://stratharchives.tumblr.com/post/167974301001/harnessing-the-winds-professor-james-blyth> [pristup ostvaren 13.06.2022.]

[12] The Wind Energy Pioneer-Poul la Cour,dostupno na linku: <http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/en/pictures/brush.htm> [pristup ostvaren 13.06.2022.]

[13] The Wind Energy Pioneer-Poul la Cour,dostupno na linku: <http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/en/pictures/lacour.htm> [pristup ostvaren 13.06.2022.]

[14] Slika Brushove vjetroturbine,dostupno na linku:

[https://www.google.hr/search?q=brush+wind+turbine&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwiWxveW\\_NT4AhV3gv0HHe5SC-IQ\\_AUoAXoECAEQAw#imgrc=5kNA8cW91YG3jM](https://www.google.hr/search?q=brush+wind+turbine&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwiWxveW_NT4AhV3gv0HHe5SC-IQ_AUoAXoECAEQAw#imgrc=5kNA8cW91YG3jM)

[pristup ostvaren 13.06.2022.]

[15] Darrieurova vjetroturbina (slika),dostupno na linku:

[https://hr.wikipedia.org/wiki/Darrieusova\\_turbina#/media/Datoteka:H-Darrieus-Rotor.jpg](https://hr.wikipedia.org/wiki/Darrieusova_turbina#/media/Datoteka:H-Darrieus-Rotor.jpg)

[pristup ostvaren 13.06.2022.]

[16] Renewable energy world,History of wind turbines,dostupno na linku:

<https://www.renewableenergyworld.com/storage/history-of-wind-turbines/#gref>

[pristup ostvaren 13.06.2022.]

[17] Najveća priobaljna vjetroelektrana svijeta Walney,dostupno na linku:

<https://www.vjetroelektrane.com/aktualno/855-najveca-priobalna-vjetroelektrana-svijeta-walney> [pristup ostvaren 13.06.2022.]

[18] Permanent magnet generator,dostupno na linku: <https://www.sogaenergyteam.com/de/focus-sogaenergies-permanent-magnet-generator-wind-turbines/> [ pristup ostvaren 13.06.2022.]

[19] Najveća evropska vjetroelektrana na kopnu Fantanele,dostupno na linku:

[https://www.google.hr/search?q=vjetroagregat+na+kopnu&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUK Ewign\\_uVwa\\_4AhXfk\\_0HHUCuAC4Q\\_AUoAXoECAEQAw&biw=1366&bih=625&dpr=1#imgrc=D KS9VFJzurxYPM](https://www.google.hr/search?q=vjetroagregat+na+kopnu&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUK Ewign_uVwa_4AhXfk_0HHUCuAC4Q_AUoAXoECAEQAw&biw=1366&bih=625&dpr=1#imgrc=D KS9VFJzurxYPM) [pristup ostvaren 13.06.2022.]

[20] Offshore wind farm,dostupno na linku: [https://wblog.wiki/bs/Offshore\\_wind\\_farm\\_i\\_slika\\_4.11.](https://wblog.wiki/bs/Offshore_wind_farm_i_slika_4.11.) [pristup ostvaren 13.06.2022.]

[21]Ispitivanje efekta zavjetrine kod vjetroagregata,dostupno na linku:

<https://www.vjetroelektrane.com/svijet/593-ispitivanje-efekta-zavjetrine-kod-vjetroagregata>

[pristup ostvaren 13.06.2022.]

[22] Small electric systems,dostupno na linku: <https://www.nrel.gov/docs/fy07osti/42005.pdf>

[pristup ostvaren 23.08.2022.]

[23] The 8 best home wind turbines in 2022,dostupno na linku: <https://www.linquip.com/blog/the-8-best-home-wind-turbines-in-2022/?amp=1>

[pristup ostvaren 23.08.2022.]

[24] Eco-friendly garden products, dostupno na linku: <https://www.leafscore.com/eco-friendly-garden-products/the-best-home-wind-turbines/>

[pristup ostvaren 23.08.2022.]

[25] Enair wind turbines, dostupno na linku: <https://www.enair.es/en/small-wind-turbines/e30pro>

[pristup ostvaren 09.09.2022.]

[26] Small wind turbine Enair 30PRO, dostupno na linku: <https://www.plantautomation-technology.com/products/enair-energy/small-wind-turbine-enair-30pro> [pristup ostvaren 09.09.2022.]

[27] 3 blades wind turbines, dostupno na linku: <https://thetechxpert.co.uk/product/1kw-1-5kw-2kw-3-blades-free-energy-vertical-axis-wind-turbine-generator-24v-48v-96v-120v-220v>

[pristup ostvaren 09.09.2022.]

[28] Small vertical axis wind turbine generator, dostupno na linku: [https://www.aliexpress.com/item/1005001618166842.html?pdp\\_npi=2%40dis%21USD%211750.00%211330.00%21%21%21%21%21%21%4021135c3916626589001686196eae2c%2112000016838029229%21affd&dp=201981-162326.54115962&aff\\_fcid=4dfff6418c4c48119427117c1e3cea9f-1662658900646-09526&aff\\_fsk&aff\\_platform=api-new-product-detail&sk&aff\\_trace\\_key=4dfff6418c4c48119427117c1e3cea9f-1662658900646-09526&terminal\\_id=b49b61ee9e0540d6a217985e5e1520ac&afSmartRedirect=y](https://www.aliexpress.com/item/1005001618166842.html?pdp_npi=2%40dis%21USD%211750.00%211330.00%21%21%21%21%21%21%4021135c3916626589001686196eae2c%2112000016838029229%21affd&dp=201981-162326.54115962&aff_fcid=4dfff6418c4c48119427117c1e3cea9f-1662658900646-09526&aff_fsk&aff_platform=api-new-product-detail&sk&aff_trace_key=4dfff6418c4c48119427117c1e3cea9f-1662658900646-09526&terminal_id=b49b61ee9e0540d6a217985e5e1520ac&afSmartRedirect=y)

[pristup ostvaren 09.09.2022.]

## SAŽETAK

U ovome radu je opisan način proizvodnje električne energije kroz desetljeća pa sve do danas. Naprave pomoću kojih to ostvarujemo zovu se vjetroturbine ili vjetroatregati. Na samome početku rada općenito se govori o obnovljivom izvoru energije – vjetru. Zatim, opisani su načini i uporaba energije vjetra kroz povijest i svi čimbenici koji utječu na vjetar. Dana su objašnjenja za eksperimentalna mjerenja i praćenja vjetra. U drugome dijelu su detaljno opisani sami vjetroatregati, njihova uporaba i razvoj kroz povijest. Opisane su podjele vjetroatregata, optimalno mjesto instalacije i aerodinamičnost vjetroturbine. Istraženi su neki od modernijih modela vjetroatregata današnjice i opisane su njihove karakteristike i značajke. Napravljena je usporedba proizvodnje električne energije na različitim mikrolokacijama s različitim vjetroatregatima i modelima.

Ključne riječi: obnovljivi izvori energije, performanse, vjetar, vjetroatregat.



## **ABSTRACT**

### **The comparison of energy performances of small wind turbines**

This paper describes the method of electricity production throughout the decades until today. The devices with which we achieve this are called wind turbines or wind aggregates. At the very beginning of the paper, we generally talk about a renewable source of energy - wind. Then, the ways and use of wind energy throughout history and all the factors that influence wind are described. Explanations are given for experimental measurements and wind monitoring. In the second part, the wind turbines are described, their use and development throughout history are described in detail. The divisions of wind turbines, the optimal installation location and the aerodynamics of the wind turbine are explained. Some of today's more modern models of wind turbines were investigated and their characteristics and features were mentioned. A comparison of electricity production was made at different locations with different wind turbines and models.

Keywords: performances, renewable energy sources, wind, wind turbine

## **ŽIVOTOPIS**

Rad je napisao Rene Glogoški. Rođen je 18.rujna 2000.godine u Osijeku. Živi s obitelji u mjestu Ivanovac u okolici Osijeka. Osnovnu školu završava s odličnim uspjehom i upisuje se u Elektrotehničku i prometnu školu Osijek, smjer elektrotehničar. Godine 2018.sudjeluje u projektu Erasmus+ i odlazi na stručnu praksu u Ujedinjeno Kraljevstvo. Srednju školu završava s odličnim uspjehom. Zbog iznimno dobrih rezultata ostvaruje pravo na izravan upis na preddiplomski sveučilišni smjer elektrotehnike i informacijske tehnologije na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku. Trenutno završava taj studij i planira upisati diplomski studij na spomenutom fakultetu.