

# Izrada makete vjetroagregata s horizontalnom osovinom

---

Cepanec, Karlo

Undergraduate thesis / Završni rad

2017

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University North / Sveučilište Sjever**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:348055>

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

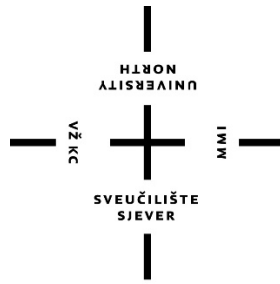
Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-14**



Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)





**Sveučilište  
Sjever**

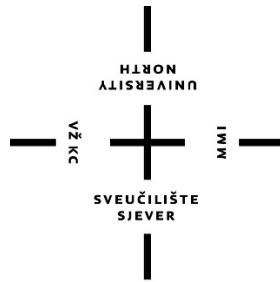
**Završni rad br. 411/EL/2017**

## **Izrada makete vjetroagregata sa horizontalnom osovinom**

**Karlo Cepanec, 0027/336**

Varaždin, rujan 2017. godine





# Sveučilište Sjever

Odjel za elektrotehniku

Završni rad br. 411/EL/2017

## **Izrada makete vjetroagregata sa horizontalnom osovinom**

**Student**

Karlo Cepanec, 0027/336

**Mentor**

Dunja Srpak, dipl.ing., predavač

Varaždin, rujan 2017. godine

# Prijava završnog rada

## Definiranje teme završnog rada i povjerenstva

ODJEL	Odjel za elektrotehniku		
PRISTUPNIK	Karlo Cepanec	MATIČNI BROJ	0027/336
DATUM	08.09.2017.	KOLEGIJ	Uređaji energetske elektronike
NASLOV RADA	Izrada makete vjetroagregata s horizontalnom osovinom		
NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU	Scale model of wind power generator with horizontal shaft		
MENTOR	Dunja Srpak	ZVANJE	predavač
ČLANOVI POVJERENSTVA	1. Miroslav Horvatić, dipl.ing., predavač 2. Dunja Srpak, dipl.ing., predavač 3. mr.sc.Ivan Šumiga, viši predavač 4. Josip Srpak, dipl.ing., predavač - rezervni član 5. _____		

## Zadatak završnog rada

BROJ	411/EL/2017
OPIS	U završnom radu je potrebno opisati različite vrste vjetroagregata, te njihove prednosti i nedostatke. Navesti glavne parametre za izbor generatora za vjetroelektranu, kao i za lokaciju izgradnje. Na maketi vlastite izrade izvršiti testiranja za različite brzine vrtnje.  U radu je potrebno: <ul style="list-style-type: none"><li>• objasniti princip rada različitih izvedbi vjetroagregata,</li><li>• opisati i objasniti parametre terena i lokacije koji utječu na izbor mjesta izgradnje vjetroelektrane,</li><li>• navesti i detaljno opisati komponente odabrane za izradu makete vjetroagregata,</li><li>• izvršiti testiranje rada makete pri različitim brzinama upravljanja,</li><li>• komentirati i analizirati dobivene rezultate.</li></ul>

ZADATAK URUČEN

21.09.2017.



*[Handwritten signature]*

## Sažetak

Uvod ovog završnog rada se upućuje u problematiku zagađenja okoliša te sve veću važnost obnovljivih izvora energije. Isto tako u uvodu su napravljene osnovne podjele i date osnovne informacije o razvoju i primjeni vjetroelektrana. Drugo poglavlje razmatra vjetar kao izvor energije. Opisuje se nastanak vjetra i njegove osnovne karakteristike. U trećem poglavlju govori se o iskorištavanju vjetra i razvoju vjetroelektrana kroz povijest. Navedena su važnija otkrića koja su prethodila vjetroelektranama kakve su poznate danas. Sljedeće poglavlje detaljno opisuje konstrukcijsku podjelu vjetroturbina. Kod vjetroturbina s vertikalnom osi navedena je osnovna podjela, prednosti i nedostaci dok su vjetroturbine s horizontalnom osi opisane prema broju lopatica, prema dijelovima i izboru lokacije. U praktičnom dijelu detaljno je opisan postupak izrade makete vjetroturbine s horizontalnom osovinom i izvršena su mjerenja parametara pri različitim brzinama upravljanja. U zadnjem poglavlju izvršena je analiza dobivenih podataka i doneseni su određeni zaključci.

**Ključne riječi:** Obnovljivi izvori energije, vjetar, vjetroelektrana, maketa, analiza

## Abstract

The introduction of this final paper points to the issue of environmental pollution and the increasing importance of renewable energy sources. In the introduction, basic divisions have been made and basic information on the development and application of wind power plants has been given. In the second chapter, wind is considered as a source of energy. The wind formation and its basic characteristics are explained. The third chapter is about exploitation of wind and the development of wind power through history. Some important discoveries that preceded the wind power plants known today are indicated. The following chapter describes the construction types of a wind turbine. Basic division, advantages and disadvantages of vertical axis wind turbine are described, while the wind turbines with the horizontal axis are described by the number of blades, according to the parts and choice of the location. In the practical part, a process of making a wind turbine model with a horizontal shaft is explained in detail and parametric measurements at different wind speeds have been performed. In the last chapter an analysis of the obtained data was performed and certain conclusions were made.

**Key words:** Renewable energy sources, wind, wind power plant, model, analysis

## Popis korištenih kratica

<b>CO<sub>2</sub></b>	Ugljikov dioksid
<b>DC</b>	Istosmjerna struja
<b>P</b>	Snaga
<b><math>\rho</math></b>	Gustoća
<b>v</b>	Brzina
<b>c<sub>p</sub></b>	Stupanj korisnosti turbine
<b>z<sub>0</sub></b>	Duljina hrapavosti
<b>v<sub>b</sub></b>	Osnovna brzina vjetra
<b>c<sub>dir</sub></b>	Faktor smjera vjetra
<b>c<sub>season</sub></b>	Koeficijent godišnjeg doba
<b>v<sub>b,0</sub></b>	Temeljna vrijednost osnovne brzine
<b>mm</b>	Milimetar
<b>mm<sup>2</sup></b>	Kvadratni milimetar
<b>cm</b>	Centimetar
<b>V</b>	Volt, mjerna jedinica

# Sadržaj

1.	UVOD .....	1
2.	VJETAR.....	3
2.1.	Snaga vjetra i krivulja snage .....	3
2.2.	Brzina vjetra .....	5
2.3.	Ruža vjetrova.....	7
3.	POVIJEST VJETROELEKTRANA.....	8
3.1.	Vjetrenjače u 19. stoljeću .....	8
3.2.	Vjetroturbine na početku 20.stoljeća.....	9
3.3.	Moderno doba .....	9
4.	PODJELA I DIJELOVI VJETROTURBINA .....	11
4.1.	Vjetroturbine s vertikalnom osi vrtnje .....	11
4.1.1.	Savonius-ov model vjetroturbine.....	11
4.1.2.	Darrieus-ov model vjetroturbine.....	12
4.1.3.	Prednosti i nedostaci vjetroturbine s vertikalnom osi vrtnje.....	12
4.2.	Vjetroturbine s horizontalnom osi vrtnje .....	13
4.2.1.	Broj lopatica.....	14
4.2.2.	Dijelovi vjetroturbine s horizontalnom osi vrtnje.....	16
4.2.3.	Izbor lokacije vjetroelektrana s horizontalnom osi vrtnje.....	19
4.2.4.	Prednosti i nedostaci vjetroturbine s horizontalnom osi vrtnje.....	22
5.	PRAKTIČNI DIO .....	23
5.1.	Popis materijala i alata .....	23
5.2.	Izrada makete .....	24
5.2.1.	Izrada postolja .....	24
5.2.2.	Izrada lopatica .....	27
5.2.3.	Odabir motora i izrada glave rotora .....	27
5.2.4.	Izrada gondole i repa.....	28
5.2.5.	Završno sklapanje dijelova i testiranje.....	30
5.3.	Završno testiranje i mjerenja .....	32
6.	ANALIZA PODATAKA .....	34
7.	ZAKLJUČAK .....	36
8.	LITERATURA .....	37





# 1. UVOD

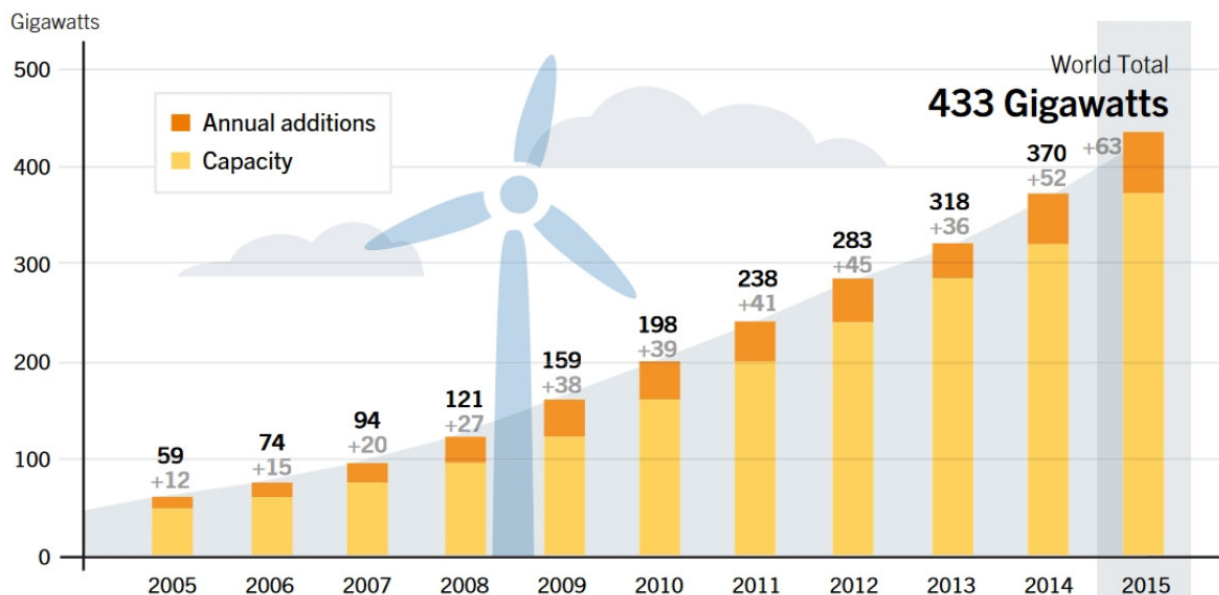
Zagađenje prirode je jedan od najvećih problema trenutno u svijetu. Indijanska poslovice kaže: “Prirodu nismo naslijedili od pradjedova, već smo je posudili od unuka.” [1]

Upravo zbog toga, ekološka svijest postaje jedan od važnih faktora funkcioniranja u suvremenom svijetu. Počinju se sve više koristiti obnovljivi izvori energije. Obnovljivi izvori energije imaju vrlo važnu ulogu u smanjenju emisije CO<sub>2</sub> u atmosferu, te se samim time smanjuje zagađenje okoliša.

Postoje više vrsta obnovljivih izvora energije kao što su: energija vode, solarna energija, biomasa, bioplín, geotermalna energija... Isto tako, sve više se koristi energija vjetra, kao ekološki izvor energije koji pruža velik potencijal, ali je još uvijek nedovoljno iskorišten. Glavna prepreka boljoj iskorištenosti je problem učinkovitog upravljanja elektroenergetskim sustavom s većim udjelom varijabilnih obnovljivih izvora energije poput solarnih elektrana ili vjetroelektrana. [2]

Energija vjetra se počela iskorištavati još u davnoj prošlosti. Ljudi su, na različite načine, pokušavali olakšati život sebi i svima oko sebe, te su pokušali prvi puta postaviti jedra na brodove i time si omogućili prijenos robe u velikim količinama na velike udaljenosti. Nakon toga energija vjetra se koristila za obavljanje mehaničkog rada u mlinovima i za pokretanje vodenih pumpi.

U modernim vremenima energija vjetra se sve više počinje koristiti za proizvodnju električne energije. U posljednja dva desetljeća energija vjetra je postala jedan od glavnih izvora električne energije za budućnost. Slikom 1.1 prikazano je godišnje povećanje korištenja snage vjetra u svrhu proizvodnje električne energije na svijetu, za razdoblje od 2005. do 2015. godine.



Slika 1.1 Kapacitet iskorištenja snage vjetra s godišnjim dodacima u svijetu, 2005.-2015. [3]

Svakoj zemlji potrebna je električna energija. Zemlje koje nemaju dovoljno elektrana za proizvodnju električne energije moraju tu energiju uvoziti iz drugih zemalja. Glavni zadatak vjetroelektrana je nadoknaditi taj dio energije koja nedostaje. Neke vjetroelektrane potiču razvoj izdvojenih područja, tako da se osigura energija onim kućanstvima koja su predaleko od centralnog energetskeg sustava te nisu bila u mogućnosti koristiti električnu energiju.

Rad vjetroelektrane se zasniva na više vrsta pretvorbi energije. Najprije se kinetička energija vjetra pretvara u mehaničku, preko lopatica. Lopatice svojom vrtnjom pokreću osovinu koja je direktno ili preko prijenosnog mehanizma vezana za električni generator. Nakon toga, mehanička energija se pomoću električnih generatora pretvara u električnu energiju.

Električna energija proizvedena u generatoru se zatim mora transformirati u takav oblik (iznosom napona, faznim kutem) kakav zahtijeva mreža u točki na koju je priključena elektrana. [4]

Najpoznatije vjetroturbine s vertikalnom osi vrtnje su Darrieus-ov i Savonius-ov model vjetroturbine, a najpoznatija izvedba vjetroturbine s horizontalnom osi je tzv. Danski koncept koji se sastoji od 3 lopatice.

## 2. VJETAR

Vjetar je strujanje zračnih masa koje nastaje uslijed razlike temperatura odnosno tlakova. S obzirom da do tih promjena temperatura dolazi zbog sunčevog utjecaja, može se reći da sva energija vjetra dolazi od sunca. Sunce zrači prema Zemlji 1015 kWh po četvornome metru. Oko 1 do 2 posto energije koja dolazi od sunca pretvara se u energiju vjetra. [5]

Vjetar, na sjevernoj polutki, ima smjer rotacije obrnutu smjeru kazaljke na satu kako se približava području niskog tlaka, a na južnoj polutki vjetar ima smjer rotacije u smjeru kazaljke na satu oko područja niskog tlaka.

Energija koju vjetar prenosi na rotor ovisi o površini kruga rotora, brzini vjetra i gustoći zraka. Pri normalnom atmosferskom tlaku pri temperaturi od 15°C zrak teži otprilike 1.2252 kg/m<sup>3</sup>, ali se povećanjem vlažnosti i gustoća povećava.[6]

Isto tako zrak je gušći kada je hladniji nego kad je topliji. Na većim nadmorskim visinama tlak zraka je niži i zrak je rjeđi. Vjetroturbina iskrivljuje putanju vjetra prije nego vjetar dođe do lopatica rotora. Iz toga možemo zaključiti da se ne može iskoristiti sva energija iz vjetra.

### 2.1. Snaga vjetra i krivulja snage

Snaga vjetra po jedinici površine određena je gustoćom i brzinom vjetra na površini na kojoj se vrše mjerenja (1).

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (1)$$

Gdje je:

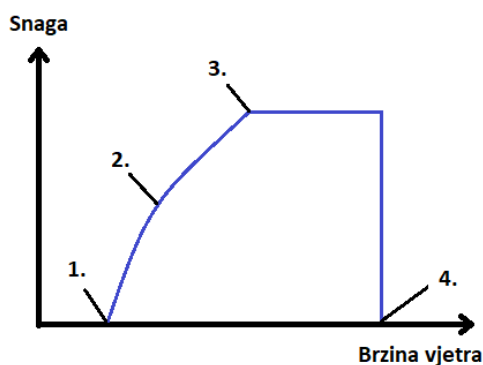
P - Snaga vjetra po jedinici površine

$\rho$  - gustoća vjetra

v - brzina vjetra

Iz jednadžbe se može vidjeti da brzina ima najveći utjecaj na snagu vjetra jer snaga ovisi o kubu brzine.

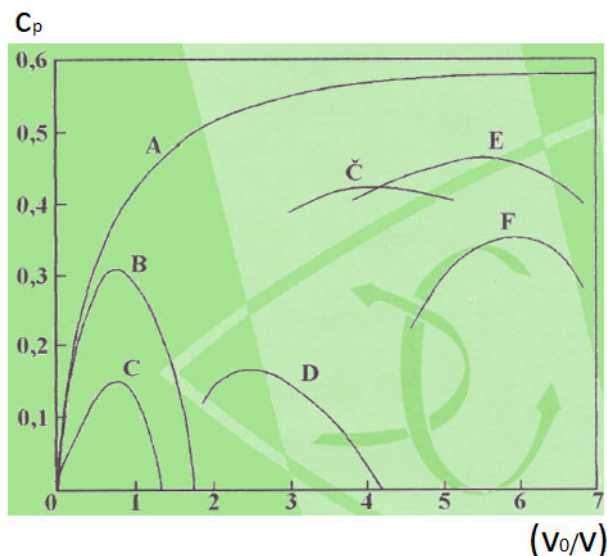
Krivulja snage, prikazana na slici 2.1, je graf koji pokazuje koliko će turbina proizvesti električne energije na različitim brzinama vjetra. Uključenje vjetroturbine je kod brzine vjetra od 3 do 5 metara po sekundi. Prestanak rada turbine naziva se brzinom isključenja, a javlja se kod brzine vjetra od približno 25m/s, da se turbina ili okolina turbine ne bi oštetila.



1. Brzina uključenja (3-5 m/s)
2. Promjena stupnja djelovanja
3. Instalirana snaga generatora
4. Brzina isključenja (25m/s)

Slika 2.1 Krivulja snage u ovisnosti o brzini vjetra

Dio ukupne kinetičke energije vjetra je neiskoristiv, jer vjetar mora nastaviti strujanje kako bi omogućio dolazak vjetru iza sebe. Prema Betzovom zakonu najveći mogući stupanj korisnosti rotora je 0,593 (16/27). Budući da dolazi do gubitaka pri prijenosu i pretvorbi energije dolazi se do zaključka da je manje od pola kinetičke energije vjetra iskoristiv kao korisna električna energija. Slika 2.2 pokazuje stupanj korisnosti rotora  $c_p$  u ovisnosti o omjeru brzine vjetra iza i ispred rotora za različite vrste turbina.



- A. Idealna izvedba rotora
- B. Vjetroturbina s više lopatica (Američki tip)
- C. Savoniusov rotor
- Č. Vjetroturbina s tri lopatice
- D. Rotor klasičnoga mlina
- E. Vjetroturbina s dvije lopatice
- F. Darrieussov rotor

Slika 2.2 Korisnost različitih vrsta vjetroturbina [7]

Sa slike 2.2 je vidljivo da spore turbine s fiksnim kutom krila kao što su Američki tip i Savoniusova turbina, imaju strmije karakteristike i ne daju veliku snagu, ali rade pri manjim brzinama vjetra. Ravnije karakteristike daju turbine s mogućnošću zakretanja lopatica i s horizontalnom osi vrtnje kao što su turbine s dvije ili tri lopatice. Darrieussov rotor i turbine s dvije ili tri lopatice koriste se kod većih brzina vjetra i za veće snage. [7]

## 2.2. Brzina vjetra

Vjetar se najčešće opisuje smjerom, jačinom i brzinom. Brzina vjetra mjeri se pomoću anemometra, a izražava se jedinicama za brzinu m/s, km/h, čvorovima ili specijaliziranom jedinicom beaufort-om. Odnos jedinica prema Beaufort-u vidljiv je u tablici 2.1. Beaufortova ljestvica služi za ocjenjivanje jačine vjetra prema njegovim učincima.

Beaufort	km/h
0	4
1	8
2	13
3	20
4	27
5	36
6	45
7	56
8	67
9	80
10	93
11	108
12	123
13	140
14	157
15	176
16	195
17	216

Tablica 2.1 Brzine vjetra prema Beaufortu

Osnovna brzina vjetra prikazana formulom (2) je maksimalna brzina vjetra za koju se može očekivati da bude premašena prosječno jednom u 50 godina, a mjeri se na visini od 10 m iznad tla, kategorije hrapavosti II. Kategorije hrapavosti prikazane su u tablici 2.2.

$$V_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot V_{b,0} \quad (2)$$

Gdje je:

- $V_b$  - osnovna brzina vjetra
- $c_{dir}$  - faktor smjera vjetra
- $c_{season}$  - koeficijent godišnjeg doba
- $V_{b,0}$  - temeljna vrijednost osnovne brzine

Faktor smjera vjetra i koeficijent godišnjeg doba najčešće su vrijednosti 1.

Kategorija terena	Karakteristike terena	$z_0$ (m)
0	- more i površine obale	0,003
I	- jezera - nema zapreka	0,01
II	- slaba vegetacija - pojedine zapreke s razmakom najmanje 20x visine zapreke	0,05
III	- normalna vegetacija, šume i predgrađa	0,3
IV	- najmanje 15% površine pokriveno je zgradama prosječne visine 15 m	1,0

Tablica 2.2 Kategorije terena [8]

Duljina hrapavosti  $z_0$  opisuje hrapavosti površina i ona je mjera veličine vrtloga uz tlo. Duljina hrapavosti utječe na intenzitet turbulencije i strujanja uz površinu. Površina zemlje se smatra ravnom, osim za lokacije blizu brežuljaka ili strmih nagiba.

Temeljna vrijednost osnovne brzine vjetra  $v_{b,0}$  određuje se iz Karte osnovne brzine vjetra za svaku državu posebno kao što je za Hrvatsku prikazano na slici 2.3.



Slika 2.3 Karta osnovne brzine vjetra za Republiku Hrvatsku [8]

S obzirom na osnovnu brzinu vjetra, obavlja se proračun opterećenja vjetrom pomoću kojeg se određuju zone opterećenja vjetra kao što je prikazano u tablici 2.3. Taj izračun je vrlo važan kod projektiranja i izgradnje vjetroturbinja jer se na temelju tih zona određuje maksimalno očekivano opterećenje konstrukcije i određuju se parametri za pravilno projektiranje vjetroturbinja.

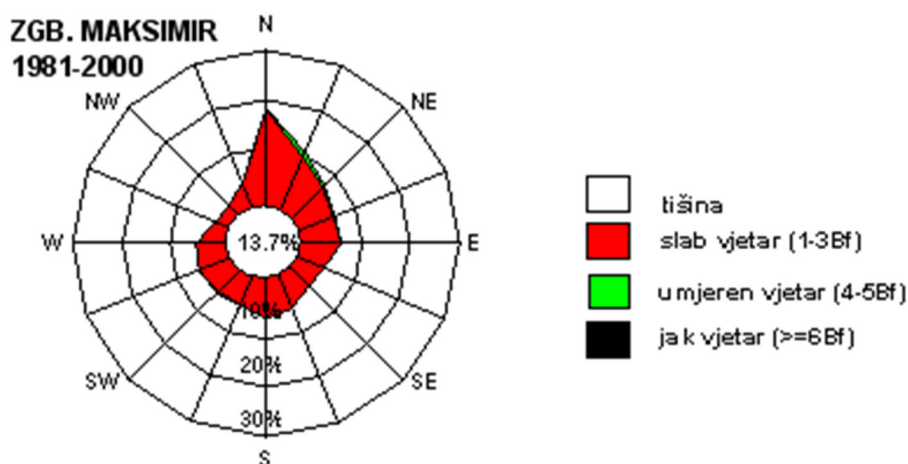
Zone opterećenja vjetra	
Zona	$v_b$ (m/s)
I	<25
II	25-30
III	30-35
IV	35-40
V	>40

Tablica 2.3 Zone opterećenja vjetra s obzirom na osnovnu brzinu vjetra

### 2.3. Ruža vjetrova

Ruža vjetrova prikazuje informacije o raspodjeli brzina i smjerova vjetrova, na temelju meteoroloških promatranja karakteristika vjetra. Prikazuje se grafički, na zvjezdastom dijagramu. Zvjezdasti dijagram je najčešće podijeljen na 8, 12 ili 16 smjerova. Za odabranu lokaciju su odgovarajućim brojem učestalosti, ucrtane pojave određenih smjerova vjetra. Te pojave se odnose na duže vremensko razdoblje (mjesec, godina ili više godina). Središte dijagrama predstavlja postotak učestalosti tišine (bez vjetra).

Provođenjem kroz 10 ili više godina, ruža vjetrova može biti vrlo važna klimatološka značajka za odabranu lokaciju. Na slici 2.4 je za primjer prikazana ruža vjetrova za Zagreb-Maksimir.



Slika 2.4 Godišnja ruža vjetrova za Zagreb-Maksimir za razdoblje 1981.-2000. [9]

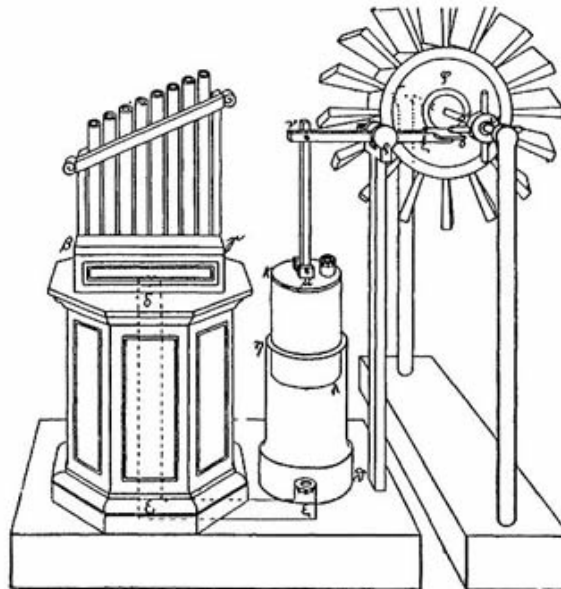


### 3. POVIJEST VJETROELEKTRANA

Najstariji zabilježeni slučaj korištenja energije vjetra za pokretanje stroja je „vjetreni rotor“ iz 1. stoljeća. Izumitelj ovog rotora je Grčki inženjer Heron Aleksandrijski. Njegov „vjetreni rotor“ je pomoću energije vjetra pokretao orgulje. „Vjetreni rotor“ je prikazan na slici 3.1.

Prve vjetrenjače s vertikalnom osi vrtnje su se upotrebljavale za pumpanje vode i mljevenje na području Afganistana i Irana u 9. stoljeću.

Najstarije zabilježeno korištenje vjetrenjače s horizontalnom osi datira iz 1185. godine u Weedley-u, Velika Britanija. Vjetrenjače, izgrađene u Europi, konstrukcijski su bile vrlo različite od Afganistanskih i Iranskih vjetrenjača. One su isto bile korištene za mljevenje i pumpanje vode kao što je slučaj i kod Nizozemskih vjetrenjača, koje su se koristile za pumpanje vode iz delte Rajne.



*Slika 3.1 "Vjetreni rotor" Herona Aleksandrijskog [10]*

#### 3.1. Vjetrenjače u 19. stoljeću

U SAD-u je od 1850. do 1900. instaliran velik broj malih vjetrenjača koje su se koristile na farmama. Bilo ih je oko 6 milijuna, a one su se koristile za pokretanje pumpi za navodnjavanje.

Prva vjetrenjača za proizvodnju električne energije patentirana je 1887. godine. Izumitelj ove vjetrenjače je prof. James Blyth iz Škotske. Vjetroturbina je bila visoka 10 m i bila je postavljena u vrtu Blyth-ove vikendice u Marykirk-u koju je i napajala električnom energijom.

Danski znanstvenik, Poul la Cour, 1891. godine razvija vjetroturbinu koja pomoću regulatora, osigurava ravnomjerno strujanje snage. U Danskoj je do 1900. godine bilo instalirano oko 2500 vjetrenjača ukupne snage oko 30 MW, koje su služile za obavljanje mehaničkog rada u mlinovima ili kao vodene pumpe. [11]

### **3.2. Vjetroturbine na početku 20.stoljeća**

Darrieus-ova vjetroturbina sa vertikalnom osi vrtnje konstruirana je 1931. godine. Lopatice su postavljene vertikalno i omogućile su korištenje vjetra iz svih smjerova, bez potrebe za sustavom zakretanja. Glavna prednost ovakve konstrukcije bila je ta što se generator i mjenjačka kutija može postaviti na razinu zemlje. Darrieus-ova vjetroturbina se koristi i danas.

Prva vjetroturbina snage preko 1 MW je bila postavljena na planini u mjestu Castletown u SAD-u. Na mrežu je bila spojena 1941. godine. Bila je to vjetroturbina snage 1,25 MW i imala je lopatice duljine 23 m.

Prvu vjetroturbinu s tri lopatice postavio je Johannes Juul 1957. godine. Ova vjetroturbina je bila snage 200 kW, imala je promjer rotora 24 m i horizontalnu os vrtnje, a radila je oko 10 godina. Postavljena je u Gedseru u Danskoj i upravo zbog toga se vjetroturbine s 3 lopatice i horizontalnom osi vrtnje nazivaju Danskim tipom vjetroturbina.

### **3.3. Moderno doba**

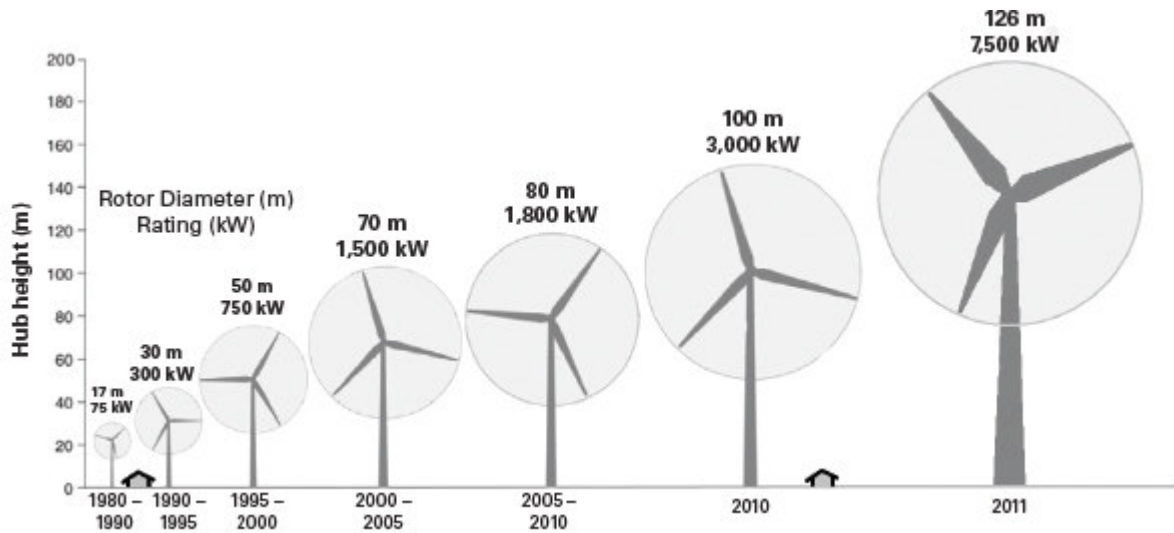
Iskorištavanje energije vjetra prioritetno za proizvodnju električne energije kao što je danas, počelo je u 1970-tim godinama zbog rastućeg problema nestanka nafte.

Upravo su se zbog toga vjetroturbine razvijale od malih, koje su se koristile na farmama, pa sve do velikih koje su se povezivale u vjetroelektrane. Male vjetroturbine bile su snage od 1 do 25 kW, a velike od 50 do 600kW. Vjetroelektrane koje su izgrađene u Kaliforniji od 1970-tih do 1990-tih su predstavljale većinu instalirane snage u svijetu.

U SAD-u je do 2000. godine instalirano 97 vjetroelektrana koje su napajale oko 600 000 kuća, a ukupna instalirana snaga je iznosila 2554 MW.

U posljednjih 15-20 godina razvoj iskorištenja energije vjetra se sve više povećava. Dimenzije vjetroturbina su se povećale za dva i više puta, a snaga se povećala za više od deset puta. Na slici 3.2 je prikazan razvoj vjetroturbina, povećanje snage, promjera lopatica i visine stupa u razdoblju od 1980. do 2011. godine.

Najveći porast izgradnje vjetroelektrana u 21. stoljeću dogodio se u Kini, koja je 2010. godine postala zemlja s najviše instalirane snage u svijetu. Do 2016. godine u Kini je instalirano ukupno 149 GW snage što predstavlja 4% ukupne potrošnje te zemlje.



Slika 3.2 razvoj vjetroturbinu u razdoblju od 1980. do 2011. [12]

## 4. PODJELA I DIJELOVI VJETROTURBINA

Vjetroturbine se najčešće dijele prema konstrukcijskom obliku vratila. Postoje vjetroturbine s vertikalnom osi vrtnje i vjetroturbine s horizontalnom osi vrtnje.

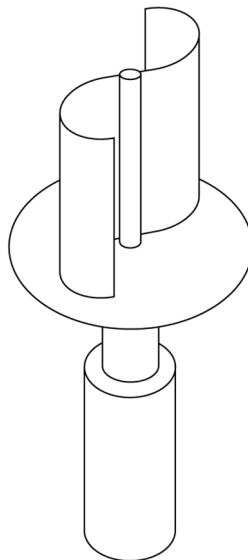
### 4.1. Vjetroturbine s vertikalnom osi vrtnje

Vjetroturbine s vertikalnom osi se sastoje od stupa koji je ujedno i vratilo i na koji su pričvršćene aerodinamične lopatice. Generator se nalazi u podnožju stupa te je zbog toga dostupniji i lakše se obavljaju popravci nego kod vjetroturbina s horizontalnom osi vrtnje. Kod vjetroturbina s okomitom osi, bez obzira na smjer dolaska vjetra, on uvijek nailazi na lopatice turbine. Postoje dva osnovna modela: Darrieus-ov i Savonius-ov model vjetroturbine.

#### 4.1.1. Savonius-ov model vjetroturbine

Ovaj oblik vjetroturbine izum je finskog inženjera Siguarsa Johanna Savoniusa 1922. godine. Savonius-ov model rotora radi na temelju otpornog djelovanja kombiniranim sa potiskom. Njegov rotor izrađen je od dviju lopatica koje se preklapaju blizu osi tako da vjetar može strujati iz jedne lopatice u drugu. Prednost ovog tipa rotora je ta što se može početi vrtjeti na malim brzinama vjetra, ali je mali postotak iskoristivosti vjetra, oko 15 %. Savonius-ov model vjetroturbine prikazan je na slici 4.1.

Savonius-Rotor

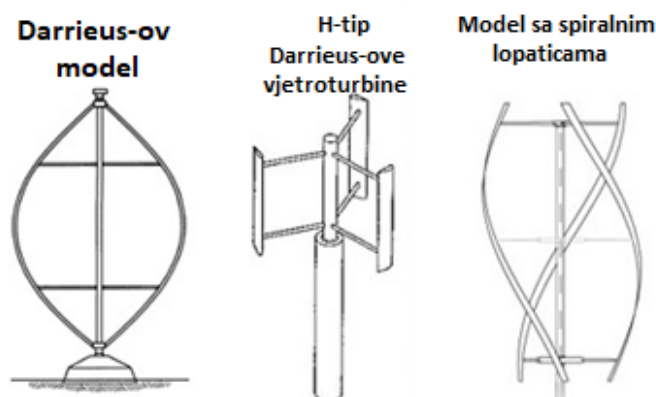


*Slika 4.1 Savonius-ov model vjetroturbine [13]*

#### 4.1.2. Darrieus-ov model vjetroturbine

Ovaj model vjetroturbine konstruirao je Francuz Georges Darrieus 1931. godine. Darrieus-ova turbina može imati dvije ili tri lopatice koje imaju oblik sličan paraboli. Prema obliku lopatica radi na principu potiska. Iskoristivost snage vjetra Darrieus-ove vjetroturbine je veća od iskoristivosti Savonius-ove vjetroturbine, a iznosi oko 35%. Nedostatak Darrieus-ove vjetroturbine je u tome što turbina ne može sama započeti rotaciju pa je potreban uređaj za pokretanje.

Razvojem Darrieus-ovog rotora izrađen je H-tip Darrieus-ove vjetroturbine. Lopatice su postavljene paralelno u odnosu na osovinu. Kod H-tipa rotora generator je najčešće izveden s permanentnim magnetima. Sljedeća podvrsta je model sa spiralnim lopaticama. Kod ovog modela je riješen problem samopokretanja pa nije potreban uređaj za pokretanje. Podvrste Darrieus-ovih vjetroturbina se nalaze na slici 4.2.



Slika 4.2 Podvrste Darrieus-ove vjetroturbine [14]

#### 4.1.3. Prednosti i nedostaci vjetroturbine s vertikalnom osi vrtnje

U tablici 4.1 prikazani su prednosti i nedostaci vjetroturbine s vertikalnom osi vrtnje.

Prednosti	Nedostaci
Ne trebaju dodatni uređaji za praćenje vjetra i okretanje vjetroturbine (smanjenje cijene).	Mali početni okretni moment.
Uređaji za kontrolu vjetroturbine i pretvorbu energije mogu biti smješteni na razini zemlje zbog okomite osi rotora (jednostavnije održavanje).	Manja iskoristivost od vjetroturbina s horizontalnom osi vrtnje.
Mogu biti dosta veće od vjetroturbina s horizontalnom osi vrtnje.	Za postavljanje i normalan rad je potrebna ravna površina tla.
Jednostavnija struktura od vjetroturbina s horizontalnom osi vrtnje.	Mali stupanj iskoristivosti.

Tablica 4.1 Prednosti i nedostaci vjetroturbine s vertikalnom osi vrtnje

## 4.2. Vjetroturbine s horizontalnom osi vrtnje

Vratilo ovih turbina je postavljeno horizontalno na vrhu stupa. Na vrh stupa u gondolu su smješteni i svi ostali dijelovi koji sudjeluju u pretvorbi energije. Lopatice ove vjetroturbine instalirane su okomito na rotacionu os. Stup vjetroturbine je visok od 1,5 do 2 promjera lopatica. Gondola se podiže na tu visinu zato da bi turbina mogla hvatati brže vjetrove.

Ove vjetroturbine moraju imati mogućnost zakretanja trupa zbog zahvaćanja vjetra iz različitih smjerova pa tako manje izvedbe imaju jednostavna krilca koja usmjeravaju vjetroturbinu u pravom smjeru dok veće imaju servo motor povezan sa senzorom.[15]

Osnovna podjela vjetroelektrana s horizontalnom osi vrtnje:

- izvedba sa stupom postavljenim iza lopatica (Slika 4.3),
- izvedba sa stupom postavljenim ispred lopatica (Slika 4.4).

Najčešće se koriste vjetroturbine sa stupom postavljenim iza lopatica. Glavna prednost ovakve izvedbe je ta što vjetar nesmetano dolazi do lopatica bez prepreka za razliku od izvedbe sa stupom iza lopatica kod kojih se javljaju turbulencije od prolaska kraj stupa. Nedostatak ove izvedbe je taj što rotor turbine mora biti izveden udaljeno od stupa, zbog opasnosti od udara elise u stup pri većim brzinama vjetra. Isto tako potreban je uređaj za zakretanje gondole i lopatica u smjeru vjetra, što povećava troškove izvedbe.



*Slika 4.3 Izvedba sa stupom postavljenim iza lopatica [16]*

Prednost izvedbe sa stupom ispred lopatica je ta da joj nije potreban mehanizam za zakretanje zbog toga što se gondola sama postavlja prema smjeru vjetra. Druga prednost ove izvedbe je ta što ovakva izvedba podnosi jače vjetrove. Lopatice se savijaju od stupa, prilikom rada i ne postoji mogućnost udara lopatice u stup. Glavni nedostatak izvedbe sa stupom ispred lopatica je taj što lopatice, prilikom prolaska pored stupa, prolaze kroz pojačane turbulencije, a time je i opterećenje

veće. Isto tako kod velikih turbina, gondola se može zakrenuti mnogo puta u istom smjeru, a time se javljaju problemi s vođenjem kablova.



*Slika 4.4 Izvedba sa stupom postavljenim ispred lopatica [17]*

#### **4.2.1. Broj lopatica**

Broj lopatica kod vjetroturbina s horizontalnom osi vrtnje varira kod različitih izvedbi. [18] Broj lopatica rotora ima veliki utjecaj na rad vjetroturbina. Vjetroturbine s horizontalnom osi vrtnje mogu imati jednu, dvije, tri ili više lopatica.

Vjetroturbine s većim brojem lopatica hvataju vjetrove manjih brzina, a vjetroturbine s manjim brojem lopatica hvataju vjetrove većih brzina.

##### Vjetroturbina s tri lopaticice

Vjetroturbina s tri lopaticice naziva se Danski tip vjetroturbina. Ove turbine koriste asinkrone ili sinkrone generatore. Vjetroturbina s tri lopaticice pokazala se kao najbolje rješenje u pogledu vibracija, sigurnosti konstrukcije i dobivene maksimalne snage. Ovaj tip vjetroturbina je relativno jednostavan i pouzdan pa je zato najviše korišten. Danski tip prikazan je na slici 4.3.

##### Vjetroturbina s dvije lopaticice

Kod vjetroturbine s dvije lopaticice dobiva se ušteda na jednoj lopatici, ali isto tako i potreba za većom brzinom vrtnje da bi se dobila jednaka količina energije kao kod vjetroturbina s tri lopaticice. Vjetroturbina s dvije lopaticice je prikazana na slici 4.5. Nedostatak je taj što veće brzine vrtnje povećavaju razinu buke i vibracija. Drugi nedostatak je taj što je kod vjetroturbina s dvije lopaticice potrebno dodatno učvršćenje lopatica za gondolu zbog naprezanja pri prolasku lopaticice pored stupa.



*Slika 4.5 Vjetroturbina s dvije lopatice[19]*

#### Vjetroturbina s jednom lopaticom

Vjetroturbina s jednom lopaticom je prikazana na slici 4.6. Ova izvedba se nije pokazala dobrom zato jer dolazi do povećane buke i vibracija prilikom rada. Da bi se vjetroturbina s jednom lopaticom uspjela zavrtjeti potrebno je postaviti uteg koji služi kao protuteža. Glavna prednost ove izvedbe je ušteda na dvije lopatice s obzirom na Danski tip vjetroturbine.



*Slika 4.6 Vjetroturbina s jednom lopaticom[20]*

#### Vjetroturbina s više lopatica

Vjetroturbina s većim brojem lopatica naziva se Američki tip vjetroturbine koji je prikazan na slici 4.7. Ova vjetroturbina još se naziva i spora vjetroturbina zbog toga jer hvata sporiji i slabiji vjetar. Vjetroturbina s više lopatica je lakša, jeftinija i jednostavnija u odnosu na brze vjetroturbine, pa je zato pogodnija kod proizvodnje električne energije na zabačenim lokacijama. Vjetroturbine s više lopatica se najčešće koriste na farmama za pogon pumpi za vodu.

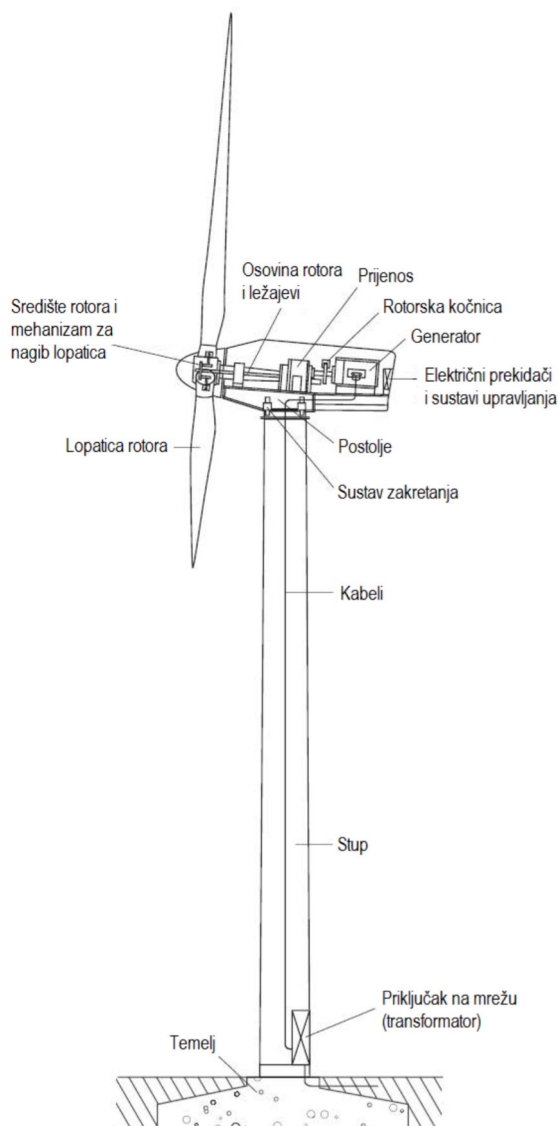




*Slika 4.7 Američki tip vjetroturbine [21]*

#### 4.2.2. Dijelovi vjetroturbine s horizontalnom osi vrtnje

Najbitniji dijelovi vjetroturbine s horizontalnom osi vrtnje su prikazani na slici 4.8.



*Slika 4.8 Dijelovi vjetroturbine s horizontalnom osi vrtnje [17]*

## Stup

Stup je važan dio vjetroturbine. Glavni zadatak stupa je podići gondolu na visinu na kojoj površina zemlje manje utječe na brzinu vjetra. Gradi se kao cjevasti, učvršćeni, konusni, povezani ili rešetkasti. Najčešće se koristi cjevasta konstrukcija, a najveće prednosti su joj velika čvrstoća i veća otpornost na vibracije s obzirom na ostale izvedbe. Unutar cjevastog stupa se nalaze ljestve, a u podnožju se nalazi transformator koji povezuje vjetroturbinu sa srednje ili visoko naponskom mrežom. Kod rešetkastih konstrukcija prednost je u jednostavnosti zato jer ju je moguće rastaviti na manje dijelove, a samim time transport i montaža pojeftinjuju. Konusni stup se najčešće koristi za manje vjetroturbine, do 20 metara.

## Gondola

Gondola se nalazi na vrhu stupa. Ona štiti generatorski sustav sa svim komponentama od utjecaja okoliša i štiti okoliš od buke tog sustava.

## Lopatice

Najviše vjetroturbina ima rotor s dvije ili tri lopatice. Mogu se razlikovati lopatice s krilcima ili sa zakretnim vrhovima. Bez obzira na vrstu izvedbe, u slučaju otkaza primarnog kočnog sustava, lopatice su ujedno sekundarni kočni sustavi jer stvaraju moment kočenja te na taj način ograničavaju brzinu vrtnje. [22]

## Rotor

Glavni dijelovi rotora vjetroturbine su lopatice i glavčina (nosač lopatica). Rotor je najčešće izrađen tako da se regulacija upadnog kuta vjetra, tijekom rada, vrši zakretanjem lopatica. Ovakav način regulacije se mora primjenjivati kod vjetroturbina sa lopaticama dužim od 25 m. Izvedba rotora s regulacijom upadnog kuta vjetra je složena pa je samim time i ukupna cijena izgradnje veća. Za takvu izvedbu rotora potreban je i poseban motor za zakretanje, koji mijenjajući kut lopatice mijenja upadni kut struje zraka.

## Kočnica

Kočnica je vrlo važan dio generatorskog sustava vjetroturbine. Najčešće je smještena na osovini prije ili poslije prijenosnika. Ako brzina vjetra prijeđe maksimalnu vrijednost (vrijednost isključenja, oko 25 m/s), dolazi do velikog opterećenja konstrukcije. U tom slučaju kočni sustav služi kako bi zaustavio rotor i smanjio mogućnost oštećenja vjetroturbine. Drugi zadatak ovog sustava je održavanje brzine vrtnje konstantnom.

## Prijenosnik snage

Prijenosnik vjetroturbine je najčešće multiplikator koji spaja sporo-okretnu s brzo-okretnom osovinom. Prijenosnik najčešće povećava brzinu vrtnje s 30 – 60 o/min na 1200 – 1500 o/min. Na

toj brzinu vrtnje radi većina standardnih izvedbi generatora električne energije. Kod izbora prijenosnika snage najveću važnost ima vrsta prijenosa i prijenosni omjer.

#### Oprema za zakretanje

Služi za zakretanje gondole kako bi se os osovine rotora izravnala sa smjerom vjetra. Oprema za zakretanje se nalazi na vrhu stupa, ispod kućišta vjetroturbine. Zakretanje vjetroturbine vrši motor, preko pužnog prijenosa. Motor mora imati ugrađenu kočnicu koja ne dozvoljava zakretanje kućišta prilikom jakog naleta vjetra.

#### Generator

Generator vjetroturbine s horizontalnom osovinom se postavlja na vrh stupa u gondolu. Pri odabiru generatora bitna je njegova pouzdanost i stoga treba uzeti u obzir uvjete povećane vlažnosti, slanosti, povišenu temperaturu... Kod pravilnog funkcioniranja sustava, generator mora imati: izdržljivost rotora u slučaju preopterećenja ili kratkog spoja i visok stupanj korisnosti.

Generatori koji se koriste u vjetroturbinama mogu biti sinkroni i asinkroni. Sinkroni generatori se primjenjuju kod stalnih brzina vrtnje. Brzina okretaja sinkronog generatora ovisi o frekvenciji i broju pari polova. Nedostaci sinkronih generatora su: teško zadržavanje sinkronizma kada dolazi do poremećaja brzine vrtnje, potreba za uzbuđnim sustavom i regulatorom brzine, a prednosti su: veći stupanj korisnosti i veća pouzdanost. Upravo se zbog veće korisnosti i pouzdanosti koriste u otočnim sustavima proizvodnje električne energije.

Asinkroni generatori se koriste za priključak vjetroelektrane na krutu mrežu. Oni su u odnosu na sinkrone generatore u prednosti zbog jednostavnijeg sustava upravljanja i fleksibilnosti u radu. Velika prednost asinkronog generatora je jednostavna i jeftina konstrukcija. Glavni nedostatak je nemogućnost rada bez napona mreže. Zbog toga je potrebno koristiti samouzбудu u obliku kondenzatora. Osim toga, asinkroni generator predstavlja potrošač jalove snage pa se moraju dodati kondenzatorske baterije koje vrše kompenzaciju. Isto tako, mora se dodati uređaj koji služi za početnu sinkronizaciju s mrežom kao što je meki upuštač (soft starter).

#### Upravljački i nadzorni sustav

Sustav je upravljan mikroprocesorki, a zadužen je za upravljanje i nadziranje rada vjetroturbine. Upravljački sustav prikuplja podatke o radu vjetroelektrane, obrađuje podatke i komunicira sa zaduženim osobljem. Ako je jednim dijelom upravljački sustav smješten na udaljenom mjestu, onda je potrebna i telekomunikacijska oprema što dodatno povećava cijenu izvedbe.

### 4.2.3. Izbor lokacije vjetroelektrana s horizontalnom osi vrtnje

Prema lokaciji izgradnje razlikuju se kopnene vjetroelektane, priobalne vjetroelektane, plutajuće vjetroelektrane i visinske vjetroelektrane.

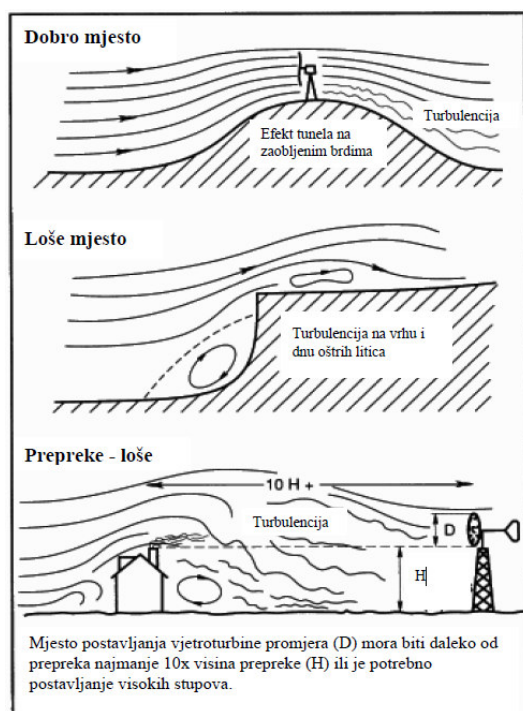
#### Kopnene vjetroelektane

Kopnene vjetroelektane, prikazane na slici 4.3, grade se najčešće na obali mora zato što vodene površine imaju malu površinsku hrapavost i neznatno utječu na brzinu vjetra. One su najčešći oblik vjetroelektrana. Kod izgradnje vjetroelektrana vrlo je bitan izbor terena. Kod većih nepravilnosti terena, površina zemlje ima veću hrapavost pa je i vjetar je više usporen.

Pomoću meteoroloških podataka, za određenu lokaciju, proračunava se opterećenje vjetrom. Proračun se vrši za posljednjih 30 ili više godina pa to može biti dobar vodič pri izboru lokacije za vjetroturbinu. Ako u području već postoje turbine, njihovi rezultati proizvodnje daju također jako dobar uvid u osobine vjetra.

Pretpostavka da bi se postigao bolji efekt postavljanjem turbina na rub litice nije točna, jer litica stvara turbulenciju i usporava vjetar čak i prije nego što dolazi do same litice, te znatno smanjuje životni vijek turbine zbog jačeg trošenja uslijed turbulencije.[5]

Do turbulencije dolazi u područjima s nejednakom površinom terena i iza velikih prepreka. Turbulencija smanjuje iskorištavanje energije vjetra. Tok vjetra s obzirom na prepreke i pravilno postavljanje vjetroturbine prikazano je na slici 4.9.



Slika 4.9 Postavljanje vjetroturbina s obzirom na tok vjetra [5]

### Priobalne vjetroeletane

Priobalna vjetroeletana, prikazana na slici 4.10, je vrsta vjetroeletane koja se postavlja u priobalnom području. Turbine ovih elektrana grade se na čvrstim temeljima na dubini mora manjoj od 60 m. Brzine vjetra su mnogo veće na moru pa je i iskoristivost snage vjetra kod priobalnih vjetroeletana velika.

Kod planiranja izgradnje priobalnih vjetroeletana projektanti moraju, kod izbora lokacije, obratiti pozornost samo na proračun opterećenja vjetrom, budući da nema prepreka. Nedostatak je taj što je izgradnja priobalnih vjetroeletana općenito skuplja od kopnenih jer su temelji ispod vode, tornjevi su viši i što je sama montaža skuplja. Održavanje takvih vjetroeletana je isto skuplje. Potrebna je i zaštita od korozije pa se dodaje katodna zaštita.

Proizvedena električna energija se do kopna prenosi podmorskim kabelom. Vjetroeletane koje su smještene na moru, trenutno su najveće u pogonu.



*Slika 4.10 Priobalna vjetroeletana Lillgrund [23]*

### Plutajuće vjetroeletane

Plutajuća vjetroeletana, prikazana na slici 4.11, je vrsta elektrane koja se postavlja na otvorenom moru. Turbine se nalaze na plutajućoj strukturi. Više vjetroatregata se povezuje zajedno kako bi se mogao koristiti zajednički podvodni kabel za prijenos električne energije.

Plutajuće vjetroturbine zahtijevaju veće početne troškove za ugradnju i održavanje. Međutim, nova studija, Project Deepwater, izrađena od strane Energy Technologies Instituta (ETI) u Velikoj Britaniji pokazala je da zbog njihovih mogućnosti da pristupe snažnijim vjetrovima koji su dalje na moru imaju potencijal primjene.[24]



*Slika 4.11 Plutajuća morska vjetroturbina [24]*

### Visinske vjetroelektrane

Visinska vjetroelektrana iskorištava energiju vjetra na većim visinama od konvencionalnih vjetroelektrana. To su vjetroelektrane koje su podignute u visinu bez potpore stupa npr. visoke zgrade kao što je prikazano na slici 4.12. Mogu se montirati bilo gdje na svijetu i mogu proizvoditi električnu energiju u 90% vremena, dok konvencionalne vjetroelektrane proizvode električnu energiju u 35% vremena. U posljednje vrijeme upravo se izgradnja ovakvih vjetroelektrana počinje sve više primjenjivati.



*Slika 4.12 Visinska vjetroelektrana [25]*

#### 4.2.4. Prednosti i nedostaci vjetroturbine s horizontalnom osi vrtnje

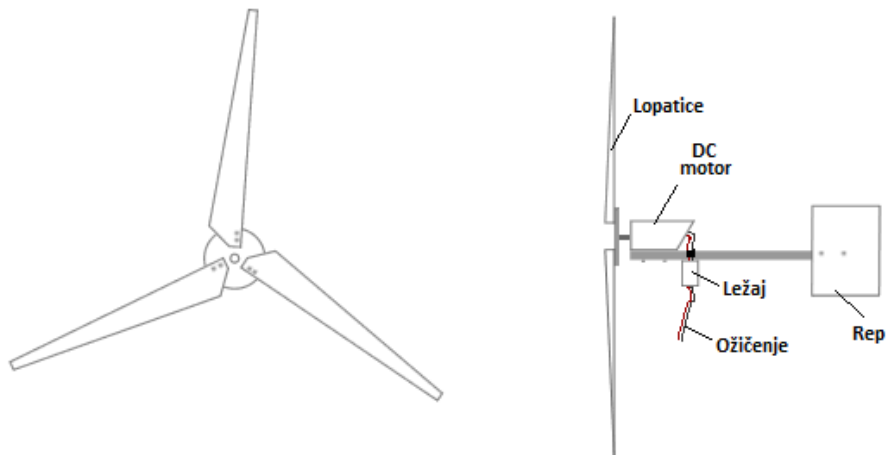
U tablici 4.2 prikazani su prednosti i nedostaci vjetroturbine s horizontalnom osi vrtnje.

Prednosti	Nedostaci
Veća učinkovitost od vjetroturbina s vertikalnom osi vrtnje.	Veliki troškovi prijevoza visokih stupova i dugačkih lopatica.
Za izgradnju ne treba ravna površina kao kod vjetroturbina s vertikalnom osi vrtnje.	Problemi u radu s turbulentnim vjetrom na niskim nadmorskim visinama
Bolja stabilnost strukture.	Skupa montaža.
Sposobnost zakretanja lopatica daje mogućnost boljeg iskorištenja energije vjetra i veću kontrolu.	Ubrzano starenje materijala zbog snažnih turbulencija.
Mogućnost zaustavljanja lopatica prilikom nevremena.	Potreba za sustavom za zakretanje lopatica i zakretanje gondole prema vjetru.
Smanjenje snage vjetra u područjima koja su inače izložena suviše jakim vjetrovima.	Otežano održavanje jer se svi važniji dijelovi nalaze na vrhu stupa u gondoli.

*Tablica 4.2 Prednosti i nedostaci vjetroturbine s horizontalnom osi vrtnje*

## 5. PRAKTIČNI DIO

Prije početka izrade vjetroturbine bilo je potrebno osmisliti cjelokupni projekt. Proučavanjem literatura posvećenih ovoj temi te crtanjem skica osmišljen je cjelokupan plan izrade. Planirano je da će se konstrukcija temeljiti na vjetroturbini s tri lopatice. Za generator je uzet 12 V DC motor s permanentnim magnetom. Izgled skice nalazi se na slici 5.1 Svaki od koraka izrade makete je detaljno opisan u nastavku.



Slika 5.1 Skica makete

### 5.1. Popis materijala i alata

Materijal potreban za izradu vjetroturbine:

- DC motor,
- Drvena daska,
- Plastična cijev,
- Ležaj,
- Metalna pločica,
- Lim,
- Vijci,
- Matice,
- Podložne pločice,
- Super lijepilo,
- Metalna kvadratna cijev,
- Vezice,
- Lemna nit,
- Mast za lemljenje,



- Dvožilni kabel,
- Kabelske stopice,
- Banana utičnice.

Alat korišten za izradu vjetroturbine:

- Bušilica,
- Ubodna pila,
- Brusilica,
- Pila za metal,
- Lemilica,
- Kliješta,
- Škare za lim,
- Aparat za zavarivanje,
- Škripac,
- Čekić,
- Kutnik,
- Šestar,
- Multimetar,
- Metar.

## 5.2. Izrada makete

### 5.2.1. Izrada postolja

Postolje vjetroturbine mora biti čvrsto, stabilno i dovoljno lagano radi njegovog prenašanja sa jedne lokacije na drugu. Postolje je napravljeno od šuplje metalne kvadratne cijevi dimenzija 2.5x2.5 cm. Korištena kvadratna cijev prikazana je na slici 5.2.



*Slika 5.2 Korištena kvadratna cijev*

Kvadratna cijev je narezana na tri dijela po 37 cm, te stup od 130 cm. S aparatom za zavarivanje svi dijelovi su zavareni u jednu cjelinu. Izgled postolja prije i nakon bojanja nalazi se na slici 5.3.



*Slika 5.3 Izgled postolja*

Zatim je na sredinu stupa zavaren stalak za voltmetar, prikazan na slici 5.4, visine 21.5 cm i širine 16 cm.



*Slika 5.4 Stalak za voltmetar*

Na vrh stupa je zavaren ležaj unutarnjeg promjera 16 mm. Ležaj omogućuje slobodno okretanje vjetroturbine na maketi prema smjeru vjetra, odnosno služi kao oprema za zakretanje kao i kod velikih vjetroturbina. Ležaj i njegov položaj na stupu, prije i nakon bojanja, prikazani su na slici 5.5.



*Slika 5.5 Ležaj i položaj ležaja na vrhu stupa*

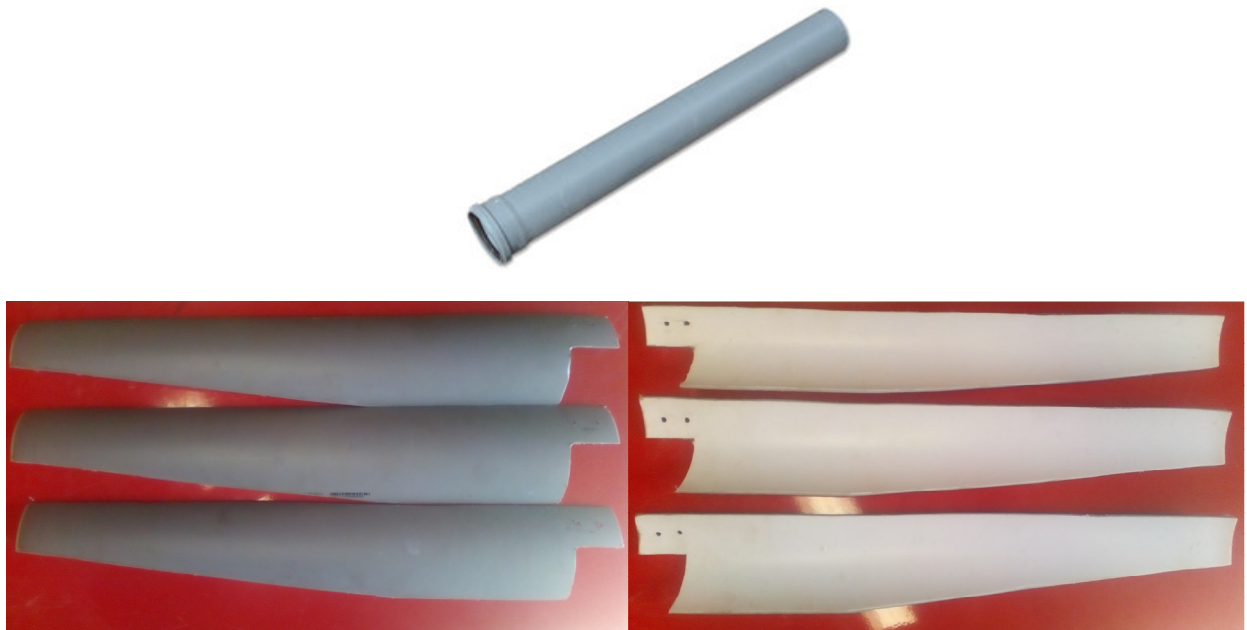
Cjelokupni izgled postolja, stupa i stalka za voltmetar nalazi se na slici 5.6.



*Slika 5.6 Cjelokupni izgled postolja, stupa i stalka za voltmetar*

### 5.2.2. Izrada lopatica

Lopaticice su napravljene od plastične cijevi promjera 11 cm i duljine 45 cm. Cijev je podijeljena na četiri dijela te je izrezan oblik lopatica. Cijev i izgled lopatica prikazani su na slici 5.7. Na početku lopatica su, pomoću bušilice, napravljena 2 provrta preko kojih će se lopaticice pričvrstiti na glavčinu rotora.



*Slika 5.7 Izgled lopatica*

### 5.2.3. Odabir motora i izrada glave rotora

Kao što je navedeno ranije, za generator je odabran malo stariji 12 V, DC motor snage 150 W s permanentnim magnetom prvenstveno zbog dostupnosti. Izgled motora tj. generatora prikazan je na slici 5.8.



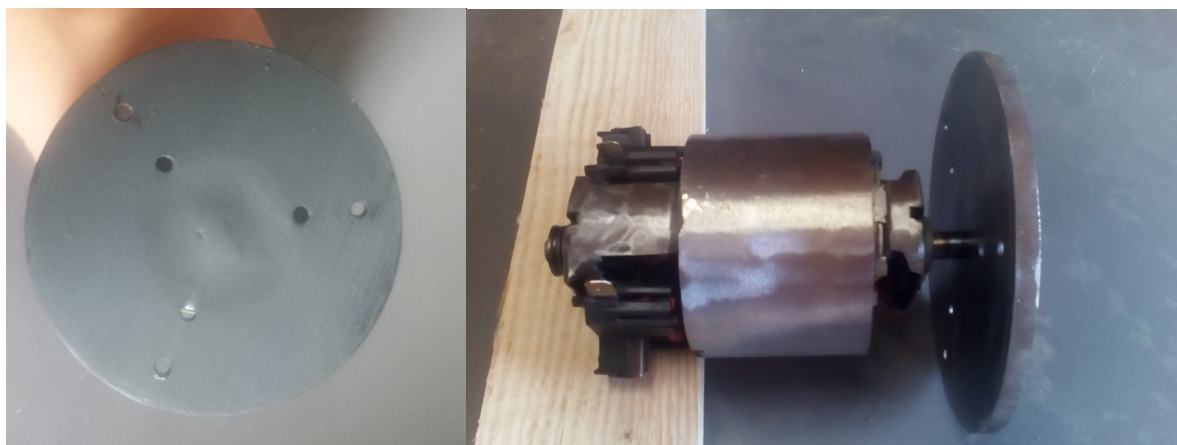
*Slika 5.8 Izgled odabranog generatora*

Nakon toga krenulo se u izradu glave rotora. Odabrana je metalna pločica promjera 10.5 cm prikazana na slici 5.9. Na sredini je napravljen provrt od 8 mm u koji će doći osovina generatora.



*Slika 5.9 Glava rotora*

Zatim je na pločici napravljeno još šest provrta na 1 i 3 cm od ruba pod kutom od  $120^\circ$  na koje će se kasnije, pomoću vijaka, pričvrstiti lopatice. S generatora je uklonjen nepotrební plastični obruč te je na osovini generatora zavarena metalna pločica. Izgled generatora prikazan je na slici 5.10.



*Slika 5.10 Generator*

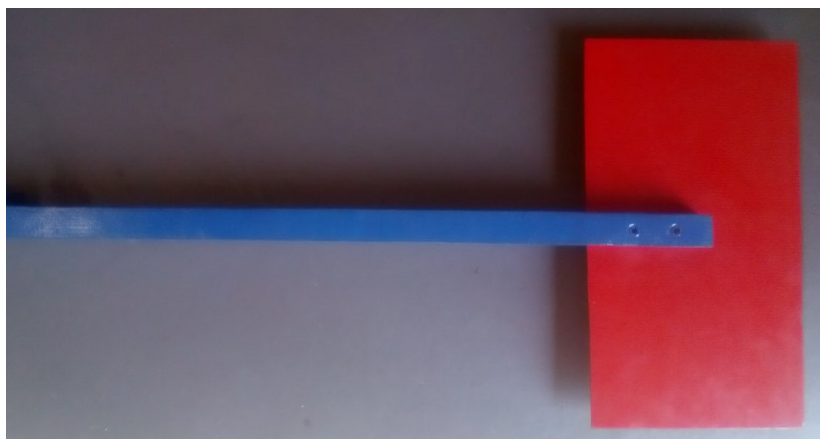
#### **5.2.4. Izrada gondole i repa**

Kako bi konstrukcija bila što lakša kao nosač generatora i repa, odabrana je drvena daska 60 cm duljine, 5.5 cm širine i 2.5 cm debljine prikazanu na slici 5.11. Daska je polirana tako da nema hrapavih površina. Na mjestu spajanja sa stupom napravljen je provrt promjera 2 cm.



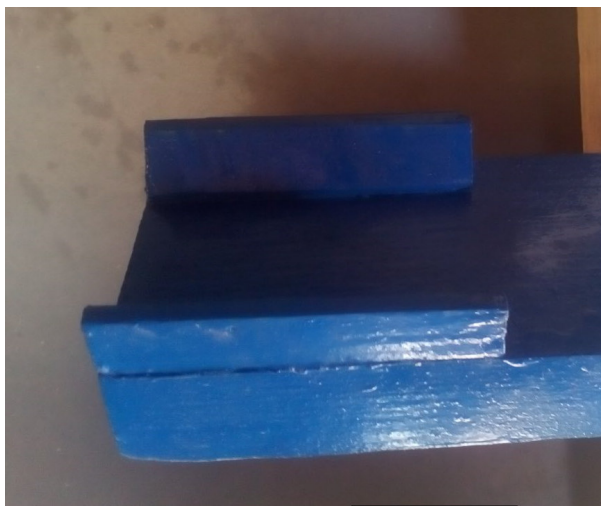
*Slika 5.11 Izgled daske*

Rep dimenzija 30 x 10 cm je izrezan sa škarama za lim. Dasku je obojana u plavu boju, a rep u crvenu. Nakon sušenja boje, rep je pričvršćen vijcima za dasku kao što je prikazano na slici 5.12.



*Slika 5.12 Montiranje repa*

Nakon toga je, pomoću super ljepila, pričvršćen nosač za generator prikazan na slici 5.13.



*Slika 5.13 Nosač generatora*

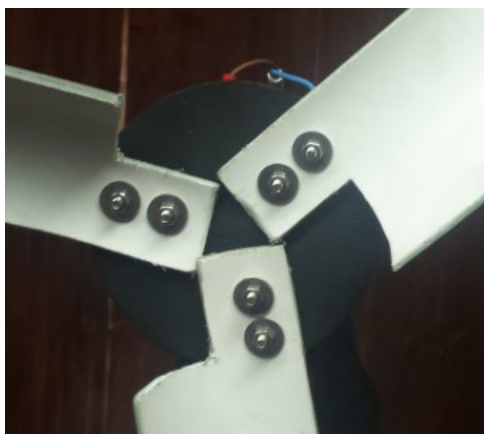
Na mjestu spajanja konstrukcije gondole sa stupom, u već prije napravljen provrt u dasci, postavljena je cijev promjera 16 mm kao što je prikazano na slici 5.14. Cijev će se uklopiti u već ranije zavaren ležaj na vrhu stupa.



*Slika 5.14 Izgled gondole*

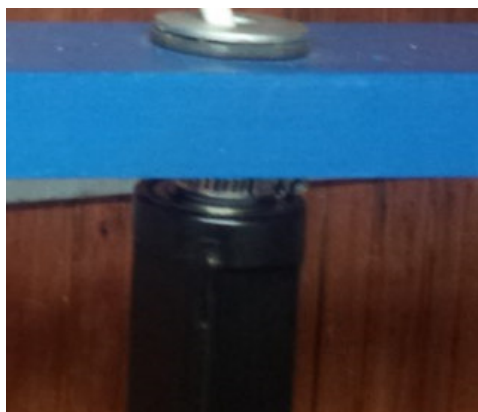
### **5.2.5. Završno sklapanje dijelova i testiranje**

Kako bi se moglo izvršiti testiranje rada makete dovršeno je njeno sklapanje. Najprije su vijcima pričvršćene lopatice na rotor generatora kao što je prikazano na slici 5.15.



*Slika 5.15 Pričvršćivanje lopatica*

Gondola je montirana na vrh stupa u ležaj tako da može slobodno rotirati oko svoje osi kao što je prikazano na slici 5.16.



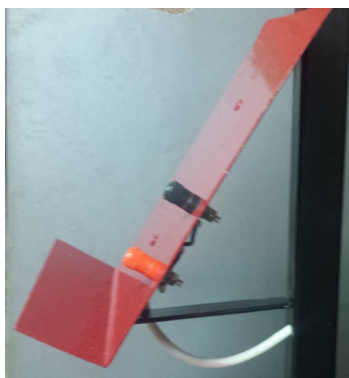
*Slika 5.16 Spajanje gondole i stupa*

Zatim je generator postavljen na stalak i pričvršćen vezicama. Nakon toga je izvršeno ožičenje generatora. Odabran je dvožilni kabel  $2 \times 0.75 \text{ mm}^2$ , s njegovog kraja je skinuta izolacija te su postavljene kableske stopice koje odgovaraju izvodima generatora. Slika 5.17 prikazuje montirani generator i postavljanje kabela.



*Slika 5.17 Montiranje generatora i postavljanje kabela*

Slika 5.18 prikazuje stalak za voltmetar na koji su montirane dvije banana utičnice. Nakon provlačenja kabela kroz stup vjetrogeneratora, drugi kraj kabela je zalemljen na utičnice.



*Slika 5.18 Postavljanje banana utičnica*

Na kraju, prije samog mjerenja, bilo je potrebno testirati rad vjetrogeneratora. Lopatice vjetrogeneratora su stoga zarotirane rukom. Testiranje je prikazano slikom 5.19.



*Slika 5.19 Testiranje rada*



Cjelokupni izgled vjetroturbine nalazi se na slici 5.20.



*Slika 5.20 Cjelokupni izgled vjetroturbine*

### **5.3. Završno testiranje i mjerenja**

Kod završnog testiranja bilo je još potrebno isprobati rad na stvarnoj lokaciji uz vjetar. Vjetar je vrlo lako zavrtio lopatice rotora kod brzine 2-3 m/s.

Mjerenja su vršena na stvarnoj lokaciji. Anemometrom, prikazanim na slici 5.21 je mjerena brzina vjetra, a multimetrom inducirani napon. Brzina vrtnje u minuti će se mjeriti tako da se broji broj okretaja u 5 sekundi koji će se pomnožiti s 12.



*Slika 5.21 Anemometar*

Na odabranoj lokaciji mjeri se brzina vjetra i brzina okretaja vjetroagregata visine 130 cm u odnosu na razinu tla. Mjerenje napona i broja okretaja u odnosu o brzini vjetra prikazano je u tablicama 5.1 i 5.2.

Br.	v (m/s)	U (V)
1.	3.6	0.105
2.	5.3	0.291
3.	6	0.401
4.	8.1	0.535
5.	9.4	0.612
6.	10.4	0.802
7.	12.9	1.01
8.	14.4	1.2

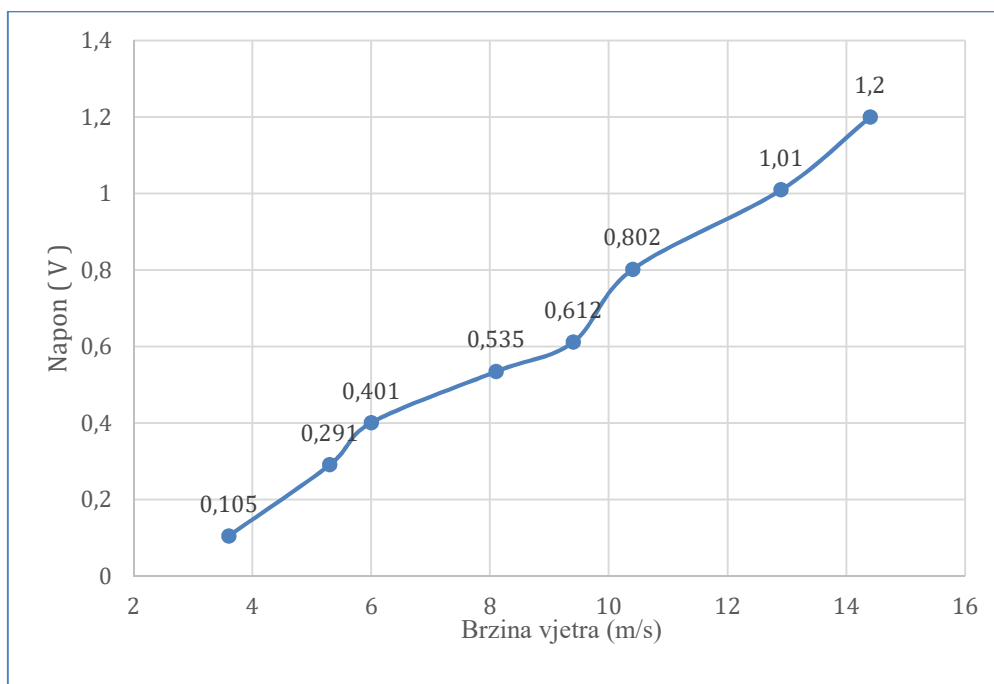
*Tablica 5.1 Ovisnost napona o brzini vjetra*

Br.	v (m/s)	n(o/min)
1.	3.6	61
2.	5.3	135
3.	6	173
4.	8.1	236
5.	9.4	283
6.	10.4	331
7.	12.9	419
8.	14.4	484

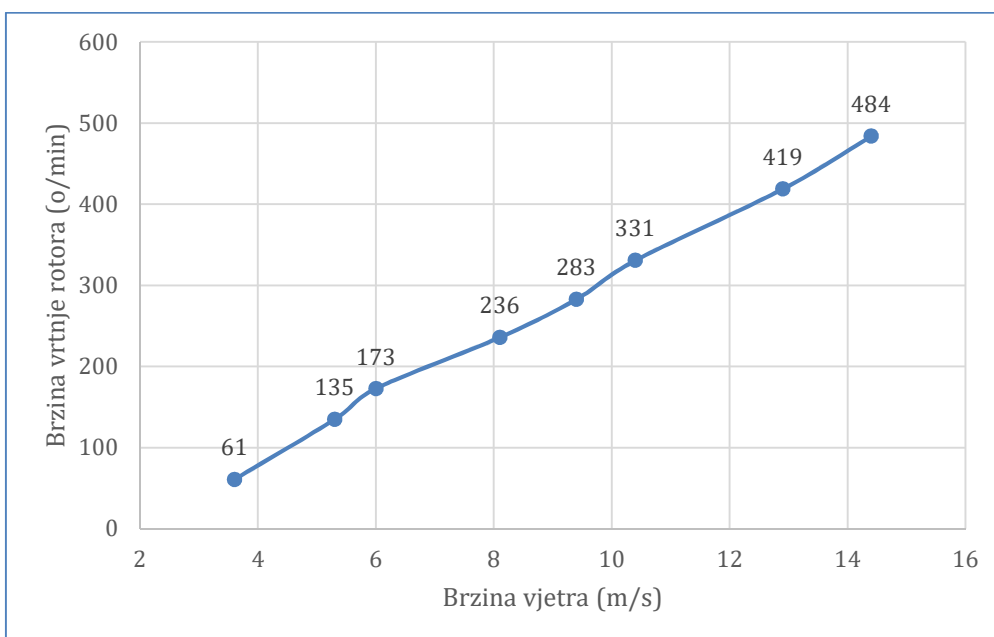
*Tablica 5.2 Ovisnost broja okretaja rotora o brzini vjetra*

## 6. ANALIZA PODATAKA

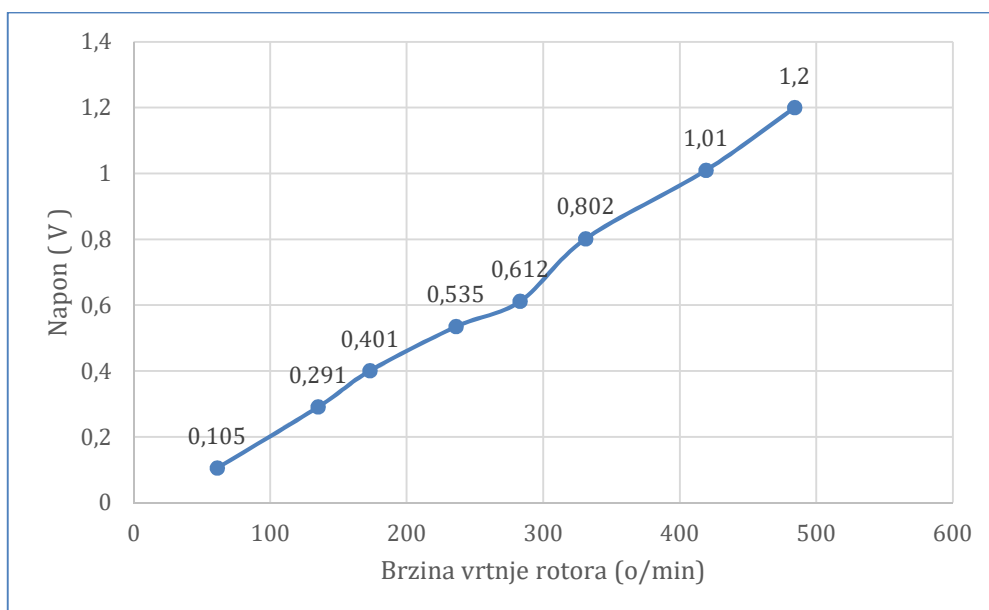
Kod analize podataka cilj je što jasnije opisati dobivene rezultate mjerenja uz pomoć dijagrama. Dijagram ovisnosti napona o brzini vjetra prikazan je na slici 6.1. Na slici 6.2 prikazan je dijagram ovisnosti brzine vrtnje rotora o brzini vjetra i na slici 6.3 prikazan je dijagram ovisnosti napona o brzine vrtnje rotora.



Slika 6.1 Dijagram ovisnosti napona o brzini vjetra



Slika 6.2 Dijagram ovisnosti brzine vrtnje rotora o brzini vjetra



*Slika 6.3 Dijagram ovisnosti napona o brzini vrtnje rotora*

Iz dijagrama sa slike 6.1 vidljivo je da veća brzina vjetra rezultira većim izlaznim naponom na stezaljkama generatora.

Sljedeći dijagram sa slike 6.2 prikazuje povećanje okretaja rotora s povećanjem brzine vjetra. Može se primijetiti da turbina rotira dosta velikim brojem okretaja pri malim brzinama vjetra pa postoji mogućnost ugradnje multiplikatora koji bi uz manji broj okretaja rotora, povećao broj okretaja osovine generatora.

Treći dijagram sa slike 6.3 pokazuje da s povećanjem broja okretaja se i povećava inducirani napon, što je i bilo logično za očekivati. Uočljivo je da je ta ovisnost približno linearna za izrađenu maketu vjetroturbine.

## 7. ZAKLJUČAK

Ekološka svijest postaje jedan od važnih faktora funkcioniranja u suvremenom svijetu. Počinju se sve više koristiti obnovljivi izvori energije. Obnovljivi izvori energije imaju vrlo važnu ulogu u smanjenju zagađenja okoliša. Budući da je vjetar obnovljiv izvor energije i ima ga u izobilju, vidi se direktan potencijal korištenja energije vjetra za proizvodnju električne energije.

U ovome završnome radu posebna pažnja je posvećena vjetroturbinama s horizontalnom osi vrtnje. Odabir vrste vjetroturbina ovisi o mnogo faktora poput izbora lokacije, količine buke izazvane radom, vremenskim uvjetima u kojima će raditi itd. Isto tako veliku važnost ima i izbor broja lopatica. Osnovni parametar koji se koristi pri odabiru lopatica je njihov utjecaj na brzinu vrtnje vjetroturbine. Manjim brojem lopatica postiže se veća brzina okretanja rotora, ali se samim time povećavaju vibracije i ugrožava se stabilnost i sigurnost konstrukcije dok se većim brojem lopatica postiže sporija vrtnja rotora vjetroturbine, ali se smanjuje snaga. Baš iz tog razloga najbolje su se pokazale vjetroturbine s tri lopatice. One pružaju dovoljnu brzinu vrtnje lopatica, a istovremeno su stabilne i sigurne.

Iz ovoga završnog rada može se naučiti osnovna podjela vjetroturbina, opisani su osnovni dijelovi vjetroturbina, pravilno postavljanje vjetroturbina i utjecaj karakteristika vjetra na rad vjetroturbine. U praktičnom dijelu prikazana je izrada makete te se kroz analizu podataka dolazi do zaključka da uz pravilno iskorištavanje energije vjetra, vjetroelektrane mogu biti važan dio budućnosti energetike.

Student:

*Karlo Cepanec*

---

(vlastoručni potpis)

U Varaždinu, 16. listopada 2017.

## 8. LITERATURA

- [1]<https://www.ekologija.com.hr/zagadenje-okolisa/> , dostupno 28.08.2017.
- [2]Dunja Srpak, Boštjan Polajžer: THE IMPACT OF WIND-POWER GENERATION ON THE PLANNING OF REGULATING RESERVE, Tehnički vjesnik, Vol.24 No.Supplement 2. Rujan 2017.
- [3]Renewable Energy Policy Network for the 21st Century(REN21): RENEWABLES 2016, GLOBAL STATUS REPORT
- [4]Dunja Srpak: PRIKLJUČENJE VJETROELEKTRANA NA ELEKTROENERGETSKI SISTEM, 22. posvetovanje "KOMUNALNA ENERGETIKA / POWER ENGINEERING", Maribor, 2013.
- [5]Doc.dr.sc. Damir Šljivac: OBNOVLJIVI IZVORI ENERGIJE, Energija vjetra, Osijek, travanj 2008.
- [6][http://www.wikiwand.com/sh/Gusto%C4%87a\\_zraka](http://www.wikiwand.com/sh/Gusto%C4%87a_zraka) , dostupno 28.08.2017.
- [7]Jože Voršič: VETRNE ELEKTRANE, Laboratorij za energetiko, UM FERİ
- [8] Zavod za konstrukcije: OPTEREĆENJE VJETROM PREMA HRN EN 1991-1-4 +NA, Metalne konstrukcije 3, Sveučilište u Zagrebu, akad. god. 16./17.
- [9] [http://www.park-maksimir.hr/Maksimir\\_hr/Maksimir\\_klima.htm](http://www.park-maksimir.hr/Maksimir_hr/Maksimir_klima.htm) ,dostupno 29.08.2017.
- [10] [http://www.wikiwand.com/fi/Tuulivoiman\\_historia](http://www.wikiwand.com/fi/Tuulivoiman_historia) , dostupno 29.08.2017.
- [11] <https://www.lmwindpower.com/en/sustainability/learn-about-wind/history-of-wind> , dostupno 29.08.2017.
- [12] <http://cdm-en.ccchina.gov.cn/Detail.aspx?newsId=42352&Tid=36>, dostupno 29.08.2017.
- [13]V. Mijailović: Distribuirani sustavi energije, Principi rada i eksploatacijski aspekti, Akademska misao, Beograd 2011.
- [14][http://www.ecosources.info/en/topics/Darrieus\\_vertical\\_axis\\_wind\\_turbine](http://www.ecosources.info/en/topics/Darrieus_vertical_axis_wind_turbine) ,dostupno 29.08.2017.
- [15] Inge Vinković: DIPLOMSKI RAD, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2009.
- [16]<http://www.takepart.com/article/2014/10/15/whats-cheapest-wind-power-blows-away-coal-and-gas-energy-source/> , dostupno 29.08.2017.
- [17]Edi Mađar: IZVEDBA VJETROAGREGATA S VERTIKALNOM OSI VRTNJE, Završni rad, SVEUČILIŠTE U RIJECI, Rijeka, srpanj 2015.
- [18]Milborrow D., Wind turbine Output and Efficiency, Wind Stats Newsletter, Vol 10, No.3., 1997.
- [19]<https://www.flickr.com/photos/7256807@N08/5379386375/in/photostream/> ,dostupno 30.08.2017.

- [20] <https://www.infonews.co.nz/photo.cfm?id=20753> , dostupno 30.08.2017.
- [21] <https://www.flickr.com/photos/7256807@N08/5364875977/in/photostream/> ,dostupno 30.08.2017.
- [22] Royal Academy of Engineering: WIND ENERGY, implications of large-scale deployment on the GB electricity system, April 2014., str. 11
- [23] <https://www.pinterest.se/pin/484207397415302211/> , dostupno 30.08.2017.
- [24] <https://www.hrastovic-inzenjering.hr/elektricna-energija/orbitalne-elektrane/34-hrastovic/savjeti/114-plutajue-morske-vjetroturbine.html> , dostupno 03.09.2017.
- [25] <http://www.energytrendsinsider.com/2009/05/12/ten-of-the-greenest-skyscrapers-in-the-world/> , dostupno 22.09.2017.

## Popis slika

Slika 1.1 Kapacitet iskorištenja snage vjetra s godišnjim dodacima u svijetu, 2005.-2015. ....	2
Slika 2.1 Krivulja snage u ovisnosti o brzini vjetra.....	4
Slika 2.2 Korisnost različitih vrsta vjetroturbina .....	4
Slika 2.3 Karta osnovne brzine vjetra za Republiku Hrvatsku .....	6
Slika 2.4 Godišnja ruža vjetrova za Zagreb-Maksimir za razdoblje 1981.-2000. ....	7
Slika 3.1 "Vjetreni rotor" Herona Aleksandrijskog .....	8
Slika 3.2 razvoj vjetroturbina u razdoblju od 1980. do 2011. ....	10
Slika 4.1 Savonius-ov model vjetroturbine .....	11
Slika 4.2 Podvrste Darrieus-ove vjetroturbine .....	12
Slika 4.3 Izvedba sa stupom postavljenim iza lopatica .....	13
Slika 4.4 Izvedba sa stupom postavljenim ispred lopatica .....	14
Slika 4.5 Vjetroturbina s dvije lopatice .....	15
Slika 4.6 Vjetroturbina s jednom lopaticom.....	15
Slika 4.7 Američki tip vjetroturbine .....	16
Slika 4.8 Dijelovi vjetroturbine s horizontalnom osi vrtnje .....	16
Slika 4.9 Postavljanje vjetroturbina s obzirom na tok vjetra.....	19
Slika 4.10 Priobalna vjetroelektrana Lillgrund.....	20
Slika 4.11 Plutajuća morska vjetroturbina.....	21
Slika 4.12 Visinska vjetroelektrana .....	21
Slika 5.1 Skica makete.....	23
Slika 5.2 Korištena kvadratna cijev .....	24
Slika 5.3 Izgled postolja .....	25
Slika 5.4 Stalak za voltmetar .....	25
Slika 5.5 Ležaj i položaj ležaja na vrhu stupa .....	26
Slika 5.6 Cjelokupni izgled postolja, stupa i stalka za voltmetar .....	26
Slika 5.7 Izgled lopatica .....	27
Slika 5.8 Izgled odabranog generatora .....	27
Slika 5.9 Glava rotora .....	28
Slika 5.10 Generator .....	28
Slika 5.11 Izgled daske .....	29
Slika 5.12 Montiranje repa .....	29
Slika 5.13 Nosač generatora .....	29
Slika 5.14 Izgled gondole .....	30



Slika 5.15 Pričvršćivanje lopatica .....	30
Slika 5.16 Spajanje gondole i stupa.....	30
Slika 5.17 Montiranje generatora i postavljanje kabela .....	31
Slika 5.18 Postavljanje banana utičnica .....	31
Slika 5.19 Testiranje rada .....	31
Slika 5.20 Cjelokupni izgled vjetroturbine.....	32
Slika 5.21 Anemometar .....	32
Slika 6.1 Dijagram ovisnosti napona o brzini vjetra .....	34
Slika 6.2 Dijagram ovisnosti brzine vrtnje rotora o brzini vjetra .....	34
Slika 6.3 Dijagram ovisnosti napona o brzini vrtnje rotora.....	35

## Popis tablica

Tablica 2.1 Brzine vjetra prema Beaufortu .....	5
Tablica 2.2 Kategorije terena.....	6
Tablica 2.3 Zone opterećenja vjetra s obzirom na osnovnu brzinu vjetra .....	7
Tablica 4.1 Prednosti i nedostaci vjetroturbine s vertikalnom osi vrtnje .....	12
Tablica 4.2 Prednosti i nedostaci vjetroturbine s horizontalnom osi vrtnje .....	22
Tablica 5.1 Ovisnost napona o brzini vjetra .....	33
Tablica 5.2 Ovisnost broja okretaja rotora o brzini vjetra .....	33



**IZJAVA O AUTORSTVU  
I  
SUGLASNOST ZA JAVNU OBJAVU**

Završni/diplomski rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, Karlo Cepanec pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor završnog rada pod naslovom „Izrada makete vjetroagregata sa horizontalnom osovinom“ te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student:  
*Karlo Cepanec*

*Karlo Cepanec*  
(vlastoručni potpis)

Sukladno Zakonu o znanstvenoj djelatnosti i visokom obrazovanju završne/diplomske radove sveučilišta su dužna trajno objaviti na javnoj internetskoj bazi sveučilišne knjižnice u sastavu sveučilišta te kopirati u javnu internetsku bazu završnih/diplomskih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice. Završni radovi istovrsnih umjetničkih studija koji se realiziraju kroz umjetnička ostvarenja objavljuju se na odgovarajući način.

Ja, Karlo Cepanec neopozivo izjavljujem da sam suglasan s javnom objavom završnog rada pod naslovom „Izrada makete vjetroagregata sa horizontalnom osovinom“ čiji sam autor.

Student:  
*Karlo Cepanec*

*Karlo Cepanec*  
(vlastoručni potpis)