

# Modela vjetroelektrane sa horizontalnom osi

---

**Sambolec, Patrik**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2024**

*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:200:561602>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-24**

*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**

**Stručni studij**

**MODEL VJETROELEKTRANE S HORIZONTALNOM  
OSI**

**Završni rad**

**Patrik Sambolec**

**Osijek, 2024.**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**Obrazac Z1S: Obrazac za ocjenu završnog rada na stručnom prijediplomskom studiju****Ocjena završnog rada na stručnom prijediplomskom studiju**

<b>Ime i prezime pristupnika:</b>	Patrik Sambolec
<b>Studij, smjer:</b>	Stručni prijediplomski studij Elektrotehnika, smjer
<b>Mat. br. pristupnika, god.</b>	R4566, 05.10.2021.
<b>JMBAG:</b>	0165085853
<b>Mentor:</b>	Zorislav Kraus, dipl. ing. el.
<b>Sumentor:</b>	
<b>Sumentor iz tvrtke:</b>	
<b>Predsjednik Povjerenstva:</b>	dr. sc. Krešimir Miklošević
<b>Član Povjerenstva 1:</b>	Zorislav Kraus, dipl. ing. el.
<b>Član Povjerenstva 2:</b>	dr. sc. Željko Špoljarić
<b>Naslov završnog rada:</b>	Modela vjetroelektrane sa horizontalnom osi
<b>Znanstvena grana završnog rada:</b>	<b>Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)</b>
<b>Zadatak završnog rada:</b>	Rezervirano za: Patrik Sambolec
<b>Datum ocjene pismenog dijela završnog rada od strane mentora:</b>	12.09.2024.
<b>Ocjena pismenog dijela završnog rada od strane mentora:</b>	Izvrstan (5)
<b>Datum obrane završnog rada:</b>	27.09.2024.
<b>Ocjena usmenog dijela završnog rada (obrane):</b>	Izvrstan (5)
<b>Ukupna ocjena završnog rada:</b>	Izvrstan (5)
<b>Datum potvrde mentora o predaji konačne verzije završnog rada čime je pristupnik završio stručni prijediplomski studij:</b>	27.09.2024.

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

Osijek, 27.09.2024.

**Ime i prezime Pristupnika:**

Patrik Sambolec

**Studij:**Stručni prijediplomski studij Elektrotehnika, smjer  
Elektroenergetika**Mat. br. Pristupnika, godina  
upisa:**

R4566, 05.10.2021.

**Turnitin podudaranje [%]:**

9

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Modela vjetroelektrane sa horizontalnom osi**

izrađen pod vodstvom mentora Zorislav Kraus, dipl. ing. el.

i sumentora

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.

Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis pristupnika:

## SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. KRATKA POVIJEST VJETROELEKTRANA .....	2
2.1 Energija vjetra u svijetu.....	5
2.2 Energija vjetra u Hrvatskoj .....	6
3. VRSTE VJETROTURBINA , OSNOVNI DIJELOVI I PROCES PRETVORBE.....	9
3.1 Vjetroturbina s horizontalnom osi.....	9
3.1.1 Broj lopatica na rotoru vjetroturbine s horizontalnom osi .....	11
3.2 Vjetroturbina s vertikalnom osi.....	11
3.2.1 Darrieusov tip VAWT .....	12
3.2.2 Savonius tip VAWT .....	12
3.3 Prednosti i nedostaci svake vrste turbine .....	13
3.4 Osnovni dijelovi vjetroturbine s horizontalnom osi.....	13
3.5 Osnovne pretvorbe energije u vjetroagregati .....	16
4. IZRADA FIZIČKOG MODELA.....	18
4.1 Izrada zračnog tunela .....	18
4.2 Izrada stupa vjetroagregata.....	19
4.3 Izbor generatora.....	19
4.4 Dizajniranje i izrada rotora.....	20
4.4.1 Glavčina .....	20
4.4.2 Lopatice .....	21
4.5 Mjerni instrument.....	23
5. MJERENJA I REZULTATI .....	26
5.1 Postavljanje eksperimenta .....	26
5.2 Postavljanje teze .....	27
5.3 Provedba mjerenja.....	27
5.4 Analiza rezultata.....	29

6. ZAKLJUČAK.....	30
7. LITERATURA .....	31
8. SAŽETAK .....	34
9. ABSTRACT.....	35

## 1. UVOD

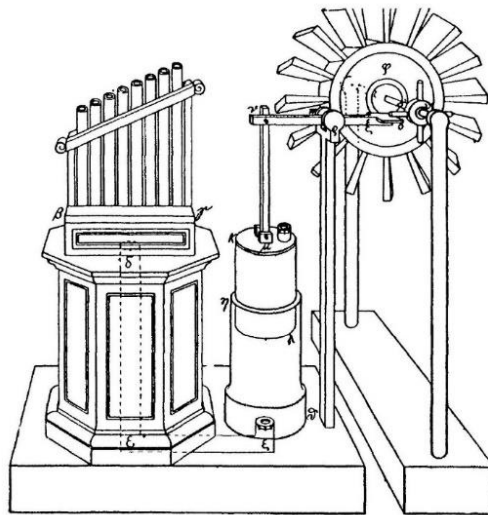
Razvoj i ulaganje u obnovljive izvore energije postaje važnije nego ikad. Prenaseljenost i ogromna potrošnja energije po glavi stanovnika, natjerali su populaciju da koristi što jeftinije i ekonomski isplativije izvore energije. Tek u novije doba ljudi počinju shvaćati kako fosilna goriva i njihovi produkti samo pogoršavaju život i zagađuju ekosustav na ovoj već izmučenoj planeti. No postoji još jedan izvor energije, a on je svuda oko nas, snaga vjetra. Snaga vjetra jedan je od najzastupljenijih načina pretvaranja kinetičke energije u električnu, a sustavi koji to omogućavaju nazivaju se vjetroelektrane.

Vjetroelektrane su postrojenja koja se sastoje od niza blisko smještenih vjetroagregata. Najzastupljeniji tip vjetroagregata su takozvani vjetroagregati s horizontalnom osi, skraćeno VAWT (eng. *Vertical Axis Wind Turbine*). Vjetroagregat je sačinjen od turbine i električnog generatora koji okretanjem osovine generira električnu energiju. Također postoje i vjetroagregati s vertikalnom osi ili HAWT (eng. *Horizontal Axis Wind Turbine*), koji se puno rjeđe koriste u komercijalnoj proizvodnji zbog njihove manje iskoristivosti s usporedbom na VAWT.

Cilj ovog rada je detaljno predstaviti i opisati princip rada i povijest vjetroelektrana s horizontalnom osi. Teorija će uključivati aspekte kao što su detaljan opis vjetroagregata te ekološki i ekonomski čimbenici vezani za izgradnju vjetroelektrana. Uz teoriju, u sam rad ulazi i fizička izrada makete vjetroelektrane s horizontalnom osi, kao i detaljna analiza mjerenja i način izrade. Izrada fizičke makete pokušati će simulirati veliki pogon. Očekuje se da će ovaj rad doprinijeti boljem razumijevanju obnovljivih izvora energije i potaknuti studente na daljnje istraživanje u ovom području.

## 2. KRATKA POVIJEST VJETROELEKTRANA

Zna se kako ljudi, već tisućama godina, koriste vjetar kako bi pogonili svoje brodove. Najjače vojske povijesti bile su pogonjene vjetrom. Međutim, taj dio mračne povijesti može se preskočiti, a pažnja usmjeriti na slučajeve u kojima se snaga te prirodne pojave počinje koristiti u drugačije svrhe. U 1. stoljeću poslije Krista, Grčki inženjer Heron iz Aleksandrije stvara neobičan stroj. Taj stroj je pomoću energije vjetra okretao kotač, koji je bio korišten za pokretanje orgulja. Heronov stroj ili takozvana "Heronova vjetrenjača" jedan je od prvih primjera gdje se energija vjetra obuzdala i koristila kako bi se pogonio neki uređaj.



*Slika 2.1. Heronova vjetrenjača koja je pokretala orgulje [19]*

Nešto kasnije između 7. i 9. stoljeća, vjetrenjače se počinju viđati i na bliskom istoku. U dijelovima Irana i Afganistana vjetrenjače nazvane "Panemone" bile su vertikalne osi i koristile su se kao mlinovi kukuruza i brašna te u nekim slučajevima su služile i za pumpanje vode.[14]

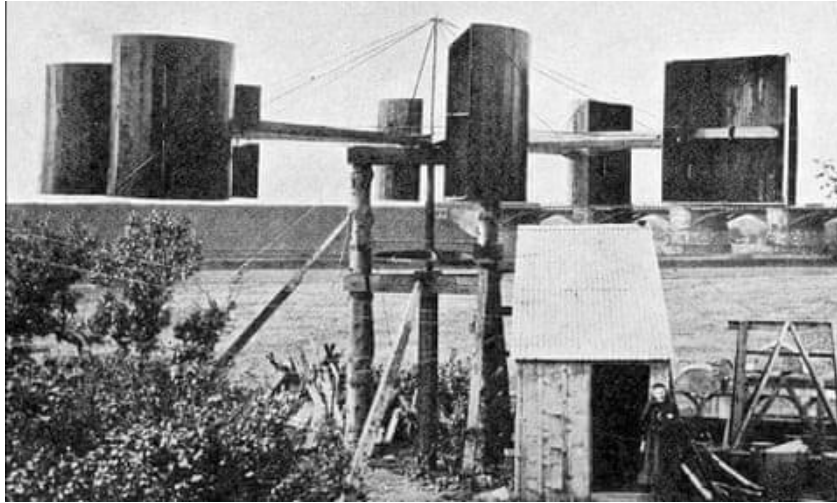




*Slika 2.2 Irske vjetrenjače "Panemone" [14]*

Izum vjetrenjače počeo se viđati diljem sjeverozapadne Europe, gdje se su se počele postavljati na horizontalnu os i koristile su se za pumpanje vode, proizvodnju soli ili kao mlinovi. Najstariji sigurni spomen jedne vjetrenjače s horizontalnom osi datira iz 1185. godine u Weedley-u, Yorkshire, Velika Britanija. Kako su te vjetrenjače bile konstrukcijski značajno različite u odnosu na Irske, smatra se da su to bila dva potpuno odvojena i neovisna otkrića.[1]

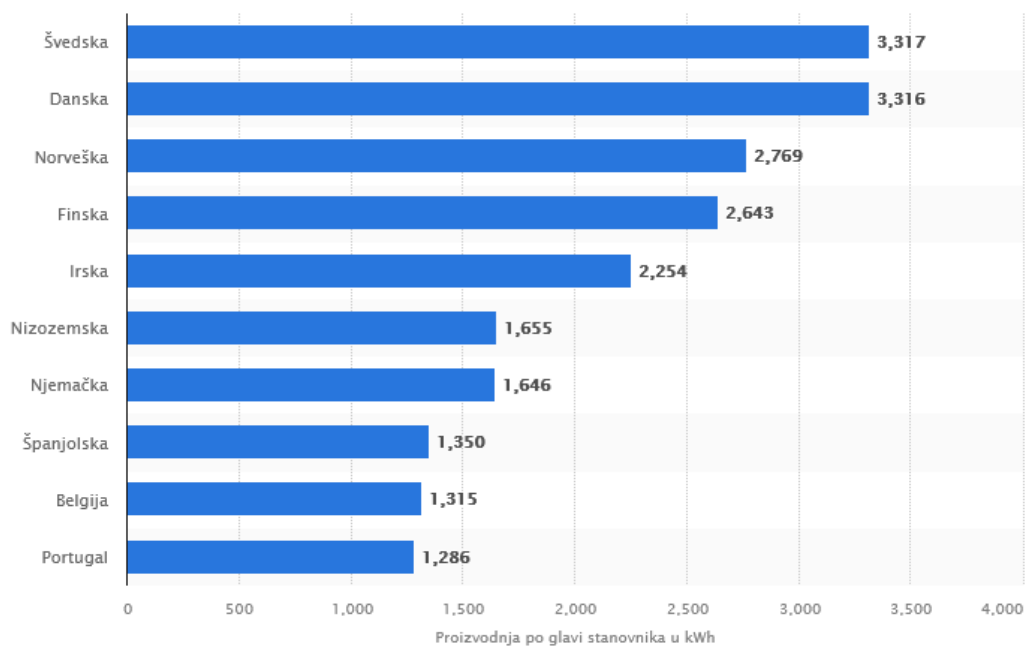
Prva vjetroturbina koja je proizvodila električnu energiju, nastala je u Škotskoj. Vjetroturbina je sagrađena od strane profesora Jamesa Blytha sa Anderson College-a u Glasgou (danas poznat i kao Strathclyde University). Blythova vjetrenjača bila je visoka 10 metara i pogonjena platnenim jedrom, te je bila instalirana u vrtu njegove kuće za odmor u selu Marykirk. Ova vjetrenjača bila je korištena za punjenje akumulatora, napravljenog od strane Francuskog izumitelja Camille Alphonse Faure-a, kako bi njegova kuća imala električne energije za unutarnju i vanjsku rasvjetu. Blyth je ponudio višak energije ljudima sela Marykirk za javnu rasvjetu, no oni to nisu prihvatili jer su mislili da je električna energija "djelo đavla".[1][15]



*Slika 2.3 Blythova vjetrenjača [15]*

Ova repriza povijesti korištenja vjetra za mehaničke i električne svrhe pokazuje evoluciju ljudske domišljatosti i prilagodljivosti. Od Heronove vjetrenjače do Blythove vjetroturbine, vidi se kako su se inovacije postupno razvijale, omogućujući korištenje prirodnih resursa na nove i korisne načine.

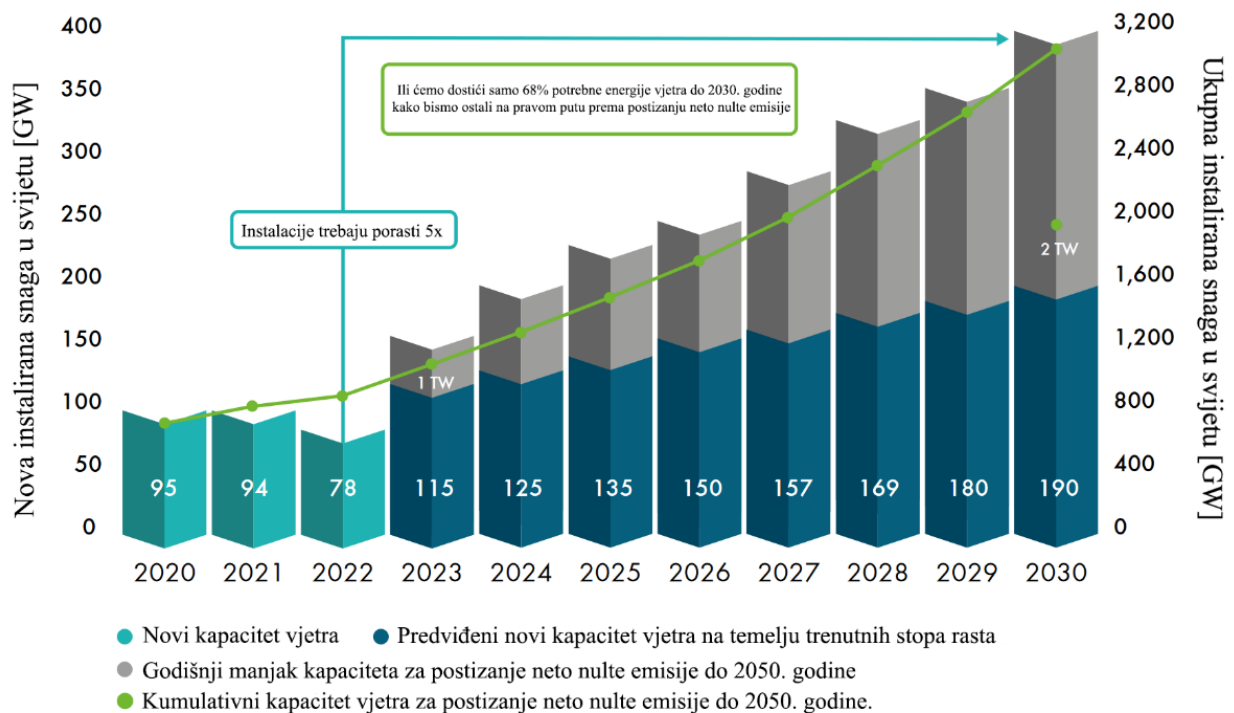
Moderne vjetroturbine dobile su svoj zamah u ranim 1970.-im. Razlog tomu bila je velika naftna kriza 1973. godine. Danci su bili među prvima koji su ih počeli proizvoditi komercijalno, te su trenutno (prema podacima iz 2023.) drugi na svijetu prema proizvedenoj snazi po glavi stanovnika, jedino iza Švedskih susjeda.[4][20]



*Graf 2.4 Proizvodnja električne energije iz energije vjetra po glavi stanovnika [20]*

## 2.1 Energija vjetra u svijetu

Globalno 2022. godine je na električne mreže priključeno 77,6 GW novog kapaciteta, čime je ukupni instalirani kapacitet vjetroelektrana dosegao 906 GW, što predstavlja godišnji rast od 9%. Godina 2022. je tek treća najbolja, prema rastu instalirane snage u povijesti, isključivo zbog poremećaja u lancu nabave uzrokovane pandemijom virusa COVID-19.



*Graf 2.5 Rast instalirane snage na temelju trenutnih stopa rasta [8]*

Prema podacima GWEC-a (Global Wind Energy Council) očekuje se ubrzani rast, te do 2030. svjetska instalirana snaga trebala bi prekoračiti 2 TW. Samo Europa u istom periodu trebala bi instalirati oko 260 GW. Trenutni najveći proizvođači struje pomoću vjetroturbina su prema godišnjoj proizvodnji Kina, Europa, Indija, SAD te Brazil.[8]

Najveći kopneni vjetropark Jiuquan nalazi se u Kini u provinciji Gansu. Ovaj vjetropark završen je 2010. godine sa instaliranom snagom 5.16 GW u prvoj fazi. S tom snagom, ovaj vjetropark proizvodio je čak tri puta više energije od sljedećeg najvećeg vjetroparka, Jaisalmer (snage 1.6GW), izgrađenog u Indiji 2001. godine. No 2021. godine Kineski vjetropark dosegao je kapacitet od 10 GW, te se planira se da će po završetku ta snaga iznositi čak 20 GW, sa oko 7000 vjetroturbina.[21]



*Slika 2.6 Jiuquan vjetropark [21]*

Najveći offshore vjetropark Dogger Bank, trenutno je u izgradnji, a nalazi se na sjeveroistočnoj obali Engleske. Kada bude priključen na mrežu 2026. godine postat će najveći svoje vrste, sa 3.6 GW instalirane snage. Ovaj vjetropark izgrađen je od trenutno najsnažnijih offshore turbina Haliade-X (marke General Electric), i osiguravati će energiju za čak 6 milijuna domova, što je oko 5% ukupne potrošnje električne energije Ujedinjenog Kraljevstva.[21]



*Slika 2.7 Dogger Bank offshore vjetropark [22]*

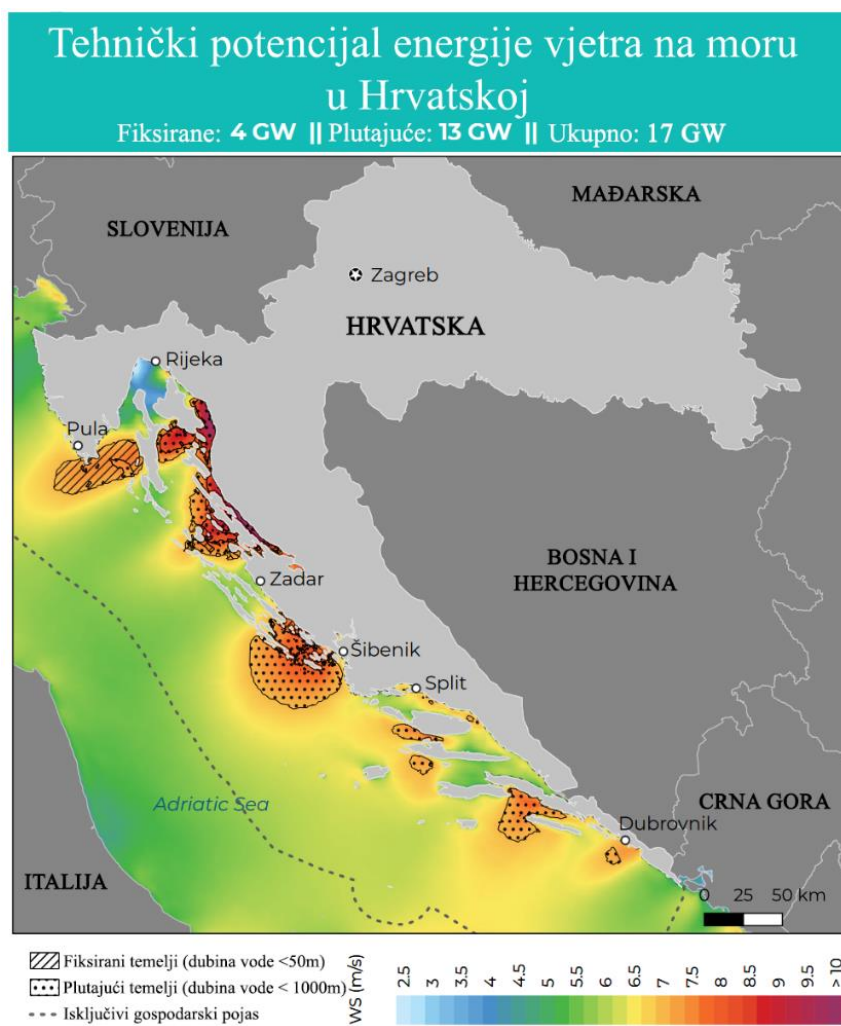
## **2.2 Energija vjetra u Hrvatskoj**

Prema podacima HOPS-a (Hrvatski operator prijenosnog sustava) iz 2023. godine, u Hrvatskoj je u pogonu bilo 25 vjetroelektrana, čija je ukupna instalirana snaga iznosila 834,15 MW. U fazi izgradnje bile su 3 vjetroelektrane, s ukupnom instaliranom snagom od 326 MW. Najveći broj

vjetroelektrana nalazi se u Šibensko-kninskoj županiji (9), Zadarskoj županiji (7+2 u probnom radu), Splitsko-dalmatinskoj županiji (6), Dubrovačko-neretvanskoj županiji (2) te Ličko-senjskoj županiji (1+1 u probnom radu).[3]

Hrvatska trenutno nema planove za izgradnju offshore vjetroelektrana, kao što to imaju zemlje poput Francuske, Grčke, Italije i Španjolske. Udruženje Obnovljivi izvori energije Hrvatske (OIEH) pokrenulo je projekt izrade studije "Akcijski plan za obnovljive izvore na moru u Hrvatskoj", te je izradu studije financirala Europska banka za obnovu i razvoj. No kako bi se taj projekat proveo, Vlada Republike Hrvatske mora inicirati niz točaka, od kojih je najvažniji izrada Državnog prostornog plana morskog područja.[23]

Hrvatska bi najviše nade u budućnosti trebala polagati u offshore turbine zbog većih brzina vjetra u Istarskom i Dalmatinskom priobalju. Na slici 2.8 možemo vidjeti kako Hrvatska ima potencijal od gotovo 17 GW, što je izrazito velik broj u odnosu na trenutnu instaliranu snagu vjetra.



Slika 2.8 Potencijal vjetra na moru u Hrvatskoj [9]

No, spajanje tolike količine energije na trenutnu infrastrukturu bilo bi gotovo nemoguće, tako da paralelno sa izgradnjom vjetroturbina potrebno je graditi i unaprijediti već postojeću prijenosnu i distribucijsku infrastrukturu.

Godine 2022., potrošnja električne energije u Republici Hrvatskoj iznosila je 18.416 GWh, i manja je za 131 GWh u odnosu na 2021. Hrvatska u prosjeku uveze samo 2340 GWh, dok ostatak proizvodi samostalno. [23] Ako iz potencijala od 17 GW iskoristimo samo 3 GW (korištenjem formule za energiju (2-1)), izračunom dobivamo 26.280 GWh što bi omogućavalo da cijela Hrvatska bude pogonjena na snagu vjetra, uz proizvedeni višak za izvoz.

$$Energija(GWh) = Snaga(GW) \times Vrijeme rada(h) \quad (2-1)$$



### **3. VRSTE VJETROTURBINA , OSNOVNI DIJELOVI I PROCES PRETVORBE**

#### **3.1 Vjetroturbina s horizontalnom osi**

Gotovo svi komercijalno uspostavljeni sustavi za energiju vjetra koriste horizontalne vjetroturbine (os rotacije je horizontalna) s tri lopatice. Glavna prednost horizontalne vjetroturbine je da se pomoću kontrole zakreta lopatica može kontrolirati brzina rotora i izlazna snaga, ovakav način upravljanja naziva se "pitch controll". Također, kontrola zakreta lopatica štiti vjetroturbinu od prevelike brzine kada brzina vjetra postane opasno visoka. Postoji još jedna vrsta kontrole brzine rotacije i naziva se "stall controll". Kod ove metode upravljanja lopatice su fiksne i oslanjaju se na zračnu dinamiku. Kada brzina vjetra postane prevelika, protok zraka preko lopatica stvara veću turbulenciju, što smanjuje brzinu rotacije rotora. Lopatice koje prenose snagu vjetra bazirane su na dizajnu propelera, tako da se razvoj tehnologije u području propelera u druge svrhe, lako može primijeniti za razvoj modernih visoko učinkovitih vjetroturbina.[5][24]

Rotori vjetroagregata mogu se podijeliti na dvije vrste, "Drag-type" i "Lift-type" rotore. Drag- type rotor ne koriste se komercijalno no mogu se još uvijek pronaći na starim vjetrenjačama, maketama, mlinovima ili Savonius VAWT vjetroturbinama. Ovaj tip rotora oslanja se na princip otpora zraka kako bi se osovina okretala. Njihova prednost je ta što su jednostavne konstrukcije i mogu raditi pri nižim brzinama vjetra. No mana im je što imaju iznimno malu učinkovitost u odnosu na Lift-type rotore. Maksimalna učinkovitost vjetroturbine s Lift-type rotorom određuje se Betz-ovim limitom koji u postotcima iznosi 59.3% dok maksimalna učinkovitost vjetroturbine s Drag-type rotorom iznosi samo 14.81%.[25]

Vjetroagregati s horizontalnom osi također se dijele se na one kojima je rotor smješten suprotno od smjera vjetra (uz vjetar) te one kojima je rotor smješten u smjeru vjetra (niz vjetar). Turbina uz vjetar okrenuta je prema vjetru s lopaticama turbine ispred gondole, dok turbina niz vjetar ima lopatice iza gondole i okrenuta je od vjetra. Turbine uz vjetar su daleko najčešće, ali turbine niz vjetar (obično s dvije lopatice) također se koriste u određenim situacijama.[11]



*Slika 3.1 Turbina niz vjetar [11]*



*Slika 3.2. Turbina uz vjetar [11]*

Pri vrlo jakim vjetrovima lopatice vjetroturbine se savijaju pod ogromnim silama. Kod turbine niz vjetar lopatice se savijaju od stupa što sprječava njihov udarac u stup. Turbine uz vjetar moraju biti dizajnirane tako da lopatice budu postavljene na dovoljnoj udaljenosti od stupa, a također moraju biti izrađene tako da ne budu savitljive (što košta više novca). Osim toga, kada se lopatice turbine niz vjetar savijaju, to smanjuje naprezanje na stupu jer se energija vjetra gubi u savijanju lopatica. Konačno, turbine niz vjetar ne trebaju rep (ili motorizirani zakretni mehanizam) kako bi se usmjerile prema vjetru jer lopatice turbine obavljaju taj zadatak (iako to također može biti ozbiljan nedostatak kod velikih turbina niz vjetar ako se žice koje prenose velike struje uvijaju unutar stupa vjetroagregata). S druge strane, turbine niz vjetar su općenito bučnije (dodatna



aerodinamička buka), a lopatice su izložene većim silama nego one kod turbina uz vjetar. Još jedan ozbiljan nedostatak turbine niz vjetar je zavjetrina iza stupa koja uzrokuje pad snage i vibracije svaki put kada lopatica prođe iza stupa.[11]

### **3.1.1 Broj lopatica na rotoru vjetroturbine s horizontalnom osi**

Često se postavlja pitanje zašto se koriste rotori sa tri, a ne sa više ili manje lopatica. Razlog tome je mnoštvo faktora kao što su učinkovitost, stabilnost, cijena, težina, zvuk, estetika i otpornost na oluje.

Ukratko, turbine s dvije lopatice su u prosjeku 10-12% jeftinije i 30% lakše od turbina s tri lopatice. Po najnovijim istraživanjima, najbolje turbine s dvije lopatice samo su 3% manje učinkovite od onih s tri. Prema ovim podacima trebale bi biti zastupljenije, no takve turbine, zbog svoje brže rotacije, pate od vibracija i problema sa stabilnošću; što uvelike smanjuje njihov vijek trajanja i povećava troškove održavanja. Osim toga stvaraju više buke od turbina s tri lopatice, što može biti problem ako su vjetroelektrane građene blizu urbanih područja.

Turbine s više od tri lopatice imaju prednost veće iskoristivosti na mjestima gdje je tijekom godine snaga vjetra manja, pošto s više lopatica mogu zahvatiti veću količinu zraka. Još jedna prednost je ta, što su tiše, i smanjuju vjerojatnost kvara zbog njihove glatkije rotacije (pogotovo turbine s pet lopatica). Najveća mana turbina s više od tri lopatice su njihova težina, cijena proizvodnje, te je njihova učinkovitost na mjestima bogatim vjetrom, nemjerljivo veća sa svakom dodanom lopaticom (<1%).[26]

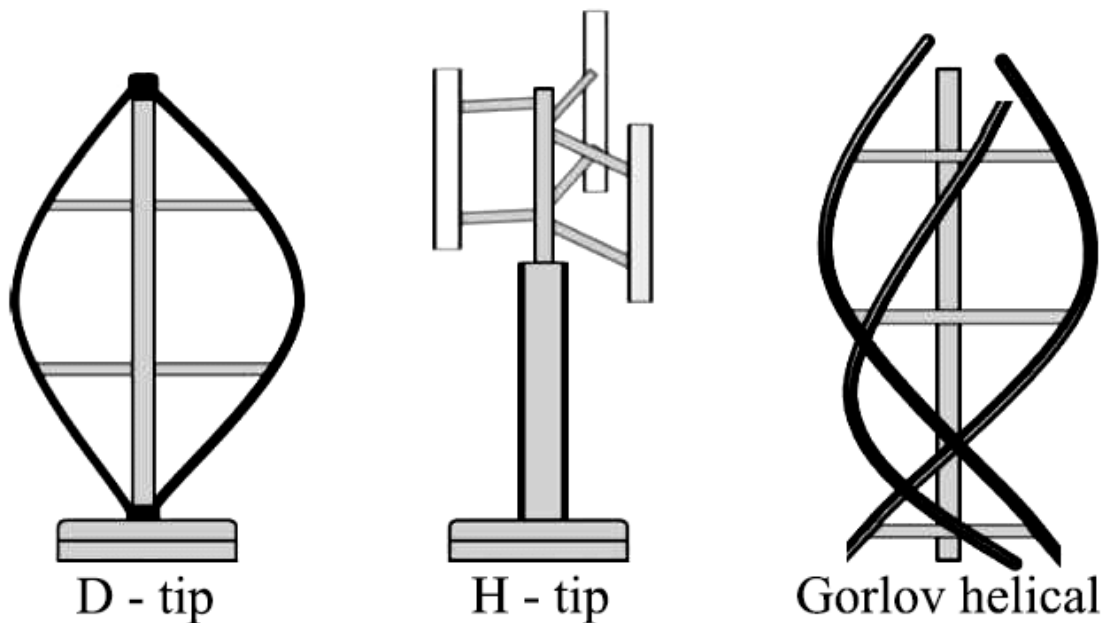
## **3.2 Vjetroturbina s vertikalnom osi**

Vjetroturbine s vertikalnom osi (VAWT) su turbine kod kojih je osovina rotora postavljena vertikalno (prema gore). Za razliku od vjetroturbina s horizontalnom osi one se ne moraju okretati u smjeru vjetra da bi imale veću učinkovitost, tako da su prikladne za mjesta gdje je smjer vjetra nepredvidiv i dinamičan. Vertikalne turbine su također tiše od horizontalnih što ih čini idealnima za korištenje u stambenim i urbanim područjima. Međutim VAWT su manje učinkoviti od HAWT tako da su i manja ulaganja u njihov napredak, no unazad nekoliko godina taj trend se mijenja. Postoje dvije glavne izvedbe ove vrste vjetroturbine:

- Darrieusova turbina
- Savonius turbina

### 3.2.1 Darrieusov tip VAWT

Prvi put patentiran 1931. godine Francuski aeronautički inženjer Georges Jean Marie Darrieus je razvio tip vjetroturbine koji se smatra najučinkovitijim među svim vertikalnim vjetroturbinama (VAWT). Svaka Darrieus vjetroturbina temeljna je na principu uzgona, odnosno, sile uzgona koje djeluju na lopatice rezultiraju pokretanjem rotora i proizvodnjom električne energije. Ovaj tip vjetroturbine ima prednost u svojoj jednostavnoj konstrukciji i niskoj cijeni. Ipak, ove turbine imaju neke probleme poput niskog startnog momenta i niske učinkovitosti. Inženjeri su kroz godine sagledali te probleme i unaprijedili Darrieusov dizajn. Razvijena je spiralna Gorlov turbina (Gorlov helical turbine - GHT) sa spiralnim lopaticama. Ova turbina ima mnoge prednosti kao što su samopokretanje, smanjena bučnost i vibracije te joj nije potreban vanjski izvor električne energije. Ovakav unaprijeđeni tip turbine dolazi do 35 % iskoristivosti, što je znatno više od starijeg dizajna. Dakle, Darrieusova turbina se može izvesti na tri načina: D-tip, H-tip ili spiralna Gorlov (helical).[6][12]



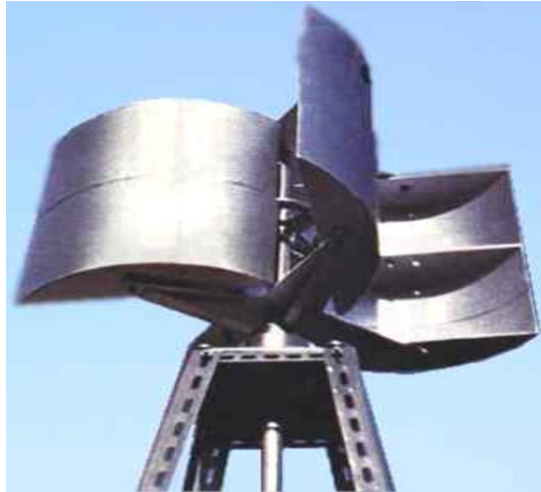
*Slika 3.3 Tipovi Darrieusove turbine [12]*

### 3.2.2 Savonius tip VAWT

Drugi tip turbine nazvan je Savonius koji je dobio ime po istoimenom Finskom inženjeru Sigurd Johannes Savonius-u. Ove turbine uglavnom djeluju na principu sile otpora.

Jedan od glavnih nedostataka Savonius turbina je negativni otpor koji djeluje na konveksni dio lopatica i varijacija momenta rotora tijekom jedne rotacije, što utječe na samopokretanje rotora pri različitim kutovima vjetra. Provedeni su eksperimenti kako bi se poboljšala učinkovitost Savonius

turbina povećanjem broja lopatica i sprječavanjem udara vjetra na konveksne dijelove. Rezultati su pokazali da zaštita rotora može postići vrlo visoku učinkovitost i da rotor s šest lopatica može postići učinkovitost od oko 30 %.[6][7]



*Slika 3.4 Savonius turbina [16]*

### **3.3 Prednosti i nedostaci svake vrste turbine**

Prednosti HAWT-a, i razlog zašto se koriste u komercijalne svrhe, može se svesti na tri glavna faktora. Učinkovitost: učinkovitije su od ostalih vrsta turbina jer mogu proizvesti više električne energije iz iste količine vjetra; Dostupnost dijelova i tehnologija: kako su zastupljenije, značajan napredak je postignut u tom sektoru, te je lakše pronaći zamjenske dijelove ili ih nadograditi za bolju učinkovitost. Veće lopatice u odnosu na VAWT: ako turbina ima veće lopatice može zahvatiti više vjetra, što znači da će proizvesti više električne energije. No postoje i nedostaci kao što su velika buka koju proizvode duge lopatice, zauzimanje velike količine prostora, te veliki rizik koji predstavljaju pticama i šišmišima koji u prolazu mogu udariti o lopaticu.[17]

VAWT s druge strane ima prednosti poput male veličine, što znači da se mogu postaviti na manjim prostorima ili urbanim sredinama. Također su tiše što smanjuje zvučno onečišćenje unutar zajednice, a i njihova manja brzina sigurnija je za leteće životinje. Neke od nedostataka VAWT tipa su naravno, manja učinkovitost, kao i teže održavanje zbog složenijih komponenti. Komponente su teže dostupne jer je ovaj tip turbine manje uobičajen.[17]

### **3.4 Osnovni dijelovi vjetroturbine s horizontalnom osi**

#### **Temelj (1)**

Temelj je veliki, teški strukturni blok betona u zemlji koji podržava cijelu turbinu i sile koje djeluju na nju. Kod vjetroturbina na moru, temelj se nalazi pod vodom.[10]

## **Priključak na EE sustav (2)**

EE sustavi i distribucijske mreže su prvobitno dizajnirani za rad s jednosmjernim tokovima snage, odnosno od elektrane prema potrošačima. Kod vjetroelektrana zbog promjena brzine strujanja vjetra dolazi do naglih promjena u izlaznom naponu, što dovodi do pojave treperenja (flickeri). Kako bi se spriječio ulazak viših harmonika u mrežu, razvijeni su međunarodni standardi. Proizvođači vjetroturbina moraju specificirati koeficijent treperenja kako bi se energetske elektrone taj problem umanjio. Također treba dati podatke o emisiji treperenja uzrokovanom operacijama uključivanja i isključivanja.[27]

## **Stup (3)**

Toranj je obično izrađen od čelika, iako se može koristiti i drvo (koje se općenito smatra manje štetnim za okoliš). Toranj obično ima tri dijela i sastavlja se na licu mjesta. Visina tornja varira, ali je obično jednaka promjeru kruga koji lopatice stvaraju kada se vrte. Toranj također sadrži električne kablove koji povezuju gondolu s transformatorom na tlu.[10]

## **Ljestve za pristup (4)**

Ljestve, koje mogu biti visoke i do 150 metara, omogućavaju pristup radnicima za servisiranje opreme u gondoli i drugim dijelovima turbine koji se nalaze na/u tornju.

## **Zakretnik (yaw drive) (5)**

Slobodno zakretanje (tipično kod nizvjetarskih/manjih turbina) je kada se turbina automatski orijentira zbog aerodinamičkih opterećenja na lopaticama. Turbine namijenjene za industrijsku proizvodnju koriste sustav za zakretanje (zupčasti motor) i senzor smjera (vjetrokaz) kako bi orijentirale lopatice rotora prema vjetru. Razlika između orijentacije rotora i smjera vjetra koristi se za aktiviranje zakretnog kretanja.

Sustav zakretanja sastoji se od motora za zakretanje, zupčanika, glavnog zupčanika i kočnica za zakretanje. Ovakav sustav koristi se kod uzvjetarskih turbina kako bi rotor bio okrenut prema vjetru dok se smjer vjetra mijenja.[10]

## **Gondola (6)**

Gondola se nalazi na vrhu tornja i može se okretati za 360° oko svoje osi, ovisno o smjeru vjetra. Ime je dobila po dijelu krila aviona koji sadrži mlazne motore. U njoj su smješteni ključni mehanički elementi: mjenjač i generator.[10]

## **Električni generator (7)**

Jedan od ograničavajućih faktora kod vjetroturbina leži u njihovoj tehnologiji generatora. Ne

postoji konsenzus među academicima i industrijom o najboljoj tehnologiji generatora vjetroturbina. Tradicionalno, postoje tri glavne vrste generatora vjetroturbina (WTG) koje se mogu razmatrati za različite sustave vjetroturbina, a to su generatori istosmjerne struje (DC), generatori izmjenične struje (AC) sinkroni i AC asinkroni generatori. U principu, svaki od njih može raditi na fiksnoj ili promjenjivoj brzini. Zbog promjenjive prirode energije vjetra, prednost je upravljati WTG-om pri promjenjivoj brzini, što smanjuje fizički stres na lopatice turbine i pogonski sustav te poboljšava aerodinamičku učinkovitost sustava.[13]

### **Anemometar i kontroler(8)**

Anemometar mjeri brzinu vjetra i prenosi podatke o brzini vjetra kontroleru. Kontroler pokreće stroj pri brzini vjetra  $V$  (brzine vjetra od oko 13 do 26 kilometara na sat (km/h)) i gasi stroj pri brzini  $V_0$  (oko 88 km/h). Turbine ne rade pri brzinama vjetra iznad  $V_0$  jer bi mogle biti oštećene visokim vjetrovima.[10]

### **Sustav kočenja (9)**

Ovaj sustav omogućava zaustavljanje ili usporavanje rotora u slučaju prekomjerne brzine vjetra, održavanja ili hitnih situacija. Postoje dvije glavne vrste kočionih sustava: aerodinamički i mehanički. Aerodinamički sustav koristi "Sustav zakretanja lopatica" (pod brojem 12.) kako bi smanjio brzinu rotora, dok mehanički sustav koristi disk kočnice smještene na glavčini rotora. Kombinacija ovih sustava osigurava da se vjetroturbina sigurno zaustavi ili kontrolira kako bi se spriječila oštećenja na vjetroturbini.[10]

### **Prijenosnik snage (mjenjač) (10)**

Mjenjač povezuje nisko-brzinski osovinu s visokobrzinskom osovnom. Povećava brzinu rotacije s otprilike 30 do 60 okretaja u minuti (o/min) na oko 1500 do 1800 o/min, što je brzina rotacije potrebna većini generatora za proizvodnju električne energije. Mjenjač je skup (i težak) dio vjetroturbine. Trenutno inženjeri istražuju "direktno-pogonske" generatore koji rade pri nižim brzinama rotacije i ne trebaju mjenjače.[10]

### **Lopatice rotora(11)**

One se nalaze na vrhu turbine. Njihova prosječna duljina je 52 metra. Vjetar uzrokuje smanjenje zračnog pritiska na jednoj strani lopatice, a razlika u odnosu na drugu stranu stvara i uzgon i otpor: kada je uzgon jači od otpora, rotor će se okretati.[10]

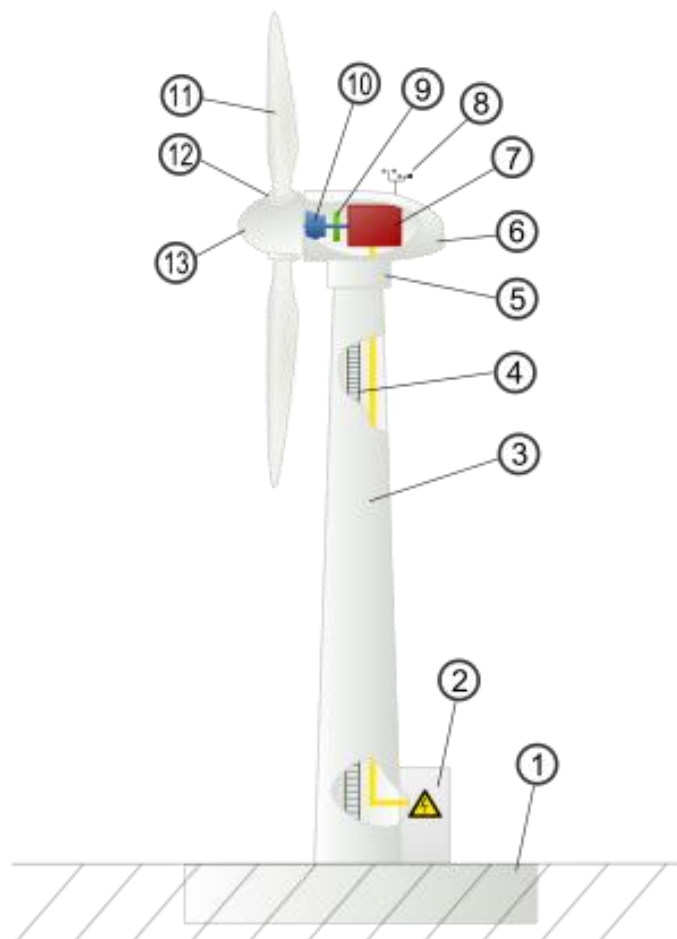
### **Sustav zakretanja lopatica (12)**

Sustav zakretanja lopatica služi za regulaciju snage koju vjetroturbina proizvodi. Ovaj sustav

omogućava promjenu kuta lopatica rotora u odnosu na smjer vjetra. Kada je brzina vjetra niska, sustav zakreće lopatice u optimalan položaj za maksimalnu proizvodnju energije, a kada brzina vjetra postane previsoka, sustav može zakrenuti lopatice kako bi se spriječila oštećenja na turbini. Time se osigurava stabilna proizvodnja električne energije i produžuje životni vijek vjetroagregata. [10]

### Glavčina rotora (13)

Kao i kod propelera na avionu, glavčina je nos koji se nalazi naprijed u središtu: na nju su pričvršćene lopatice, a ona je osovinom povezana s mehaničkim dijelovima u gondoli koja se nalazi iza nje.[10]



*Slika 3.4 Vjetroagregat s vodoravnom osovinom [18]*

### 3.5 Osnovne pretvorbe energije u vjetroagregati

Kinetička energija vjetra pretvara se u kinetičku energiju rotacije preko lopatica rotora vjetroturbine. Specifična snaga vjetra ( $P_{vj}$ ) određena je kubom brzine vjetra ( $v^3$ ) i gustoćom zraka  $\rho$ . Izražava se kao:

$$P_{vj} = \frac{\rho \times v^3}{2} \quad (3-1)$$

U općem slučaju, budući da brzina vjetra varira, prosječna specifična snaga izračunava se uzimajući u obzir promjene brzine vjetra tijekom vremena. Prosječna specifična snaga vjetra ( $P_{vj}$ ) jednaka je srednjoj vrijednosti specifične snage koja se računa na temelju promjenjive brzine vjetra, što uključuje sve promjene u brzini. Stoga se izražava kao:

$$P_{vj} = \frac{1}{2T} \times \int \rho \times v^3(t) dt \quad (3-2)$$

Kinetička energija vjetra ( $E_{k,vj}$ ) dobiva se množenjem kinetičke snage vjetra ( $P_{vj}$ ) s vremenom

$$E_{k,vj} = \int_0^t P_{vj}(t) dt \quad (3-3)$$

Ukupna kinetička energija vjetra ne može se iskoristiti zbog konstantnog strujanja vjetra, te dolaska novog. Ovaj princip naziva se Betzov zakon. Koeficijent iskoristivosti ( $c_p$ ) računa se kao omjer snage na vratilu rotora (stvarne mehaničke snage) i snage strujanja vjetra.

$$c_p = \frac{P_t}{P_{vj}} = \frac{P_t}{\frac{1}{2} \times \rho \times v^3} \quad (3-4)$$

Koeficijent iskoristivosti ( $c_p$ ) za suvremene vjetroturbine približno iznosi 0,45 a na nekima ide čak i do 0,5.

Betzov limit je najveći mogući stupanj aerodinamičke pretvorbe i iznosi 16/27 ili 0,593. Trenutno ne postoje vjetroagregati koji su u mogućnosti imati veću iskoristivost.

$$P_{t,max} = 0.593 \times \frac{\rho \times v^3}{2} \quad (3-5)$$

Kako prilikom svake pretvorbe dolazi do gubitaka, manje od pola kinetičke energije vjetra pretvara se u korisnu električnu energiju.[7]

## 4. IZRADA FIZIČKOG MODELA

Kako je zadatak završnog rada bila izrada fizičkog modela vjetroagregata, velika pažnja je posvećena izboru materijala. Pokušali su se izabrati materijale koji su lako obradivi, ali i da imaju određenu čvrstoću kako bi model bio što precizniji.

### 4.1 Izrada zračnog tunela

Zračni tunel služi kako bi osigurali kontrolirano strujanje zraka oko objekta (u ovom slučaju su to lopatice vjetroturbine), te time stvaramo pouzdane uvjete za testiranje. Za izradu zračnog tunela koristio sam šperploču kao temeljnu osnovu. Šperploča je odrezana na odgovarajuću veličinu kako bi pružila stabilnu bazu za cijelu konstrukciju. Zatim su na šperploču pričvršćeni limeni obruči. Obruči su postavljeni tako da formiraju okvir na kojem će stajati prozirna PVC folija. Nakon što su obruči bili sigurno pričvršćeni, pažljivo je obavijena prozirna PVC folija oko njih, osiguravajući da je folija ravnomjerno nategnuta i čvrsto fiksirana vijcima i leptir maticama.



*Slika 4.1 Zračni tunel*

Prilikom izrade zračnog tunela, izrađena je i vodilica od kvadratne čelične cijevi. Kako bi se omogućilo nesmetano kretanje klizača, precizno je izrezan utor duž cijevi kutnom brusilicom. Taj izrezani utor omogućava torban vijku da slobodno prolazi, zadržavajući pritom stabilnost cijele strukture. Na torban vijak postavljene su podloške i leptir matica, koja omogućava jednostavno zatezanje klizača na željenoj poziciji.





*Slika 4.2 Čelična vodilica*

## **4.2 Izrada stupa vjetroagregata**

Stup vjetroagregata izrađen je od čelika, s dvije ugrađene karike koje su zategnute maticama kako bi se generator čvrsto fiksirao na svoje mjesto.



*Slika 4.3 Stup vjetroagregata na čeličnoj vodilici*

## **4.3 Izbor generatora**

Prilikom izbora generatora bilo je važno da generator proizvodi vrlo male napone stoga je izabran generator marke PHYWE koji generira napon između 0 i 5.9 V. Ovaj generator također ima dugu

navojnu osovinu, idealnu za montažu turbine. Priključci se sastoje od dvije 4 mm "banana" utičnice, što omogućuje jednostavno povezivanje s mjernim instrumentima.



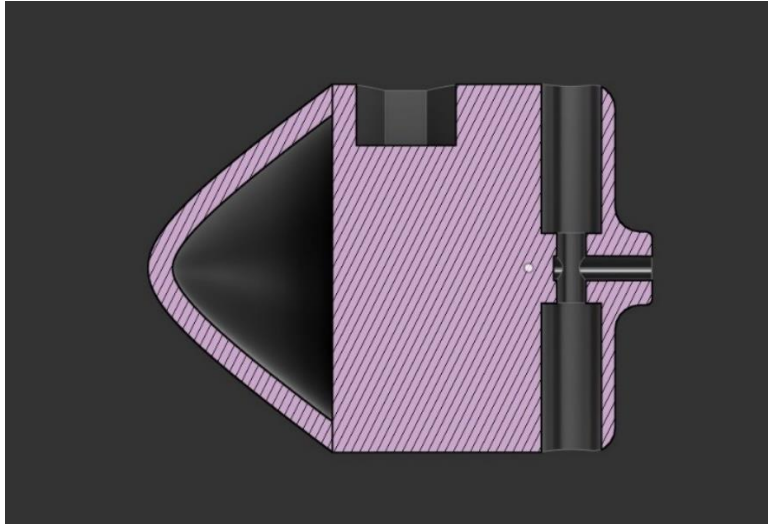
*Slika 4.4 Generator marke PHYWE*

## **4.4 Dizajniranje i izrada rotora**

Svi dijelovi poput glavčine i lopatica dizajnirani su u programu Autodesk Fusion360 i isprintani pomoću 3D printera "Bambu Lab X1-Carbon". U svim dijelovima koji su bili printani bio je korišten PLA filament za printer.

### **4.4.1 Glavčina**

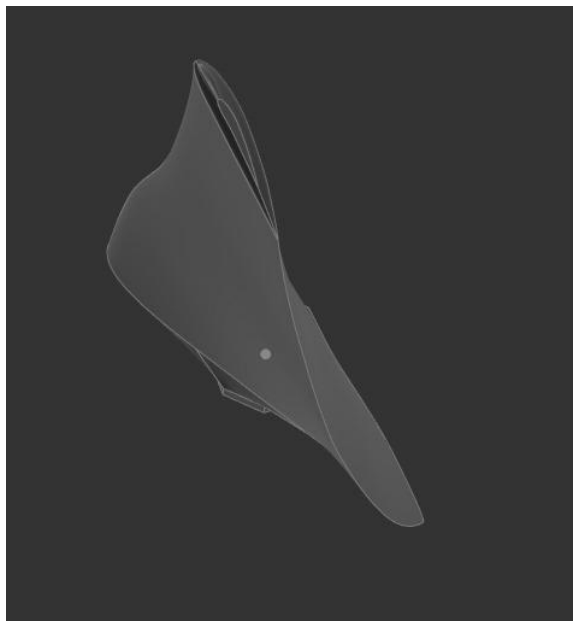
Glavčina rotora sastoji se od dva dijela: osnovnog dijela, koji je povezan s osovinom generatora, i kapice, koja poboljšava protok zraka oko glavčine, čime doprinosi učinkovitosti. Na slici je prikazan 3D model izrađen u programu Autodesk Fusion360, gdje su vidljivi utori za lopatice u obliku osmerokuta, što pomaže u stabilnosti spoja. Također je prikazano i mjesto gdje se glavčina spaja na osovinu generatora. Dva utora s gornje i donje strane predviđena su za umetanje vijaka, koji osiguravaju čvrsto zatezanje rotora na osovinu, čime se povećava stabilnost i sigurnost spoja.



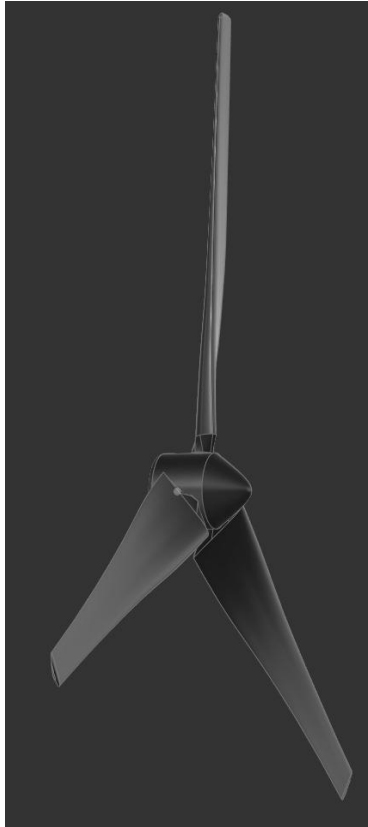
*Slika 4.5 Glavčina rotora u programu Fusion360*

#### **4.4.2 Lopatice**

Lopatice rotora, također 3D isprintane, napravljene su pomoću geometrije NACA (National Advisory Committee for Aeronautics) aeroprofila. Profili korišteni u svrhu projekta su NACA 8420, NACA 4415, NACA23112, tim redom duž lopatice. Svi podaci o dizajnu pronađeni su ovdje (<https://www.naca4cad.com/>). Radijus turbine određen je na 38cm kako bi se nesmetano okretala u zračnom tunelu. Na slikama **4.6** i **4.7** vidimo kako taj dizajn izgleda u programu.

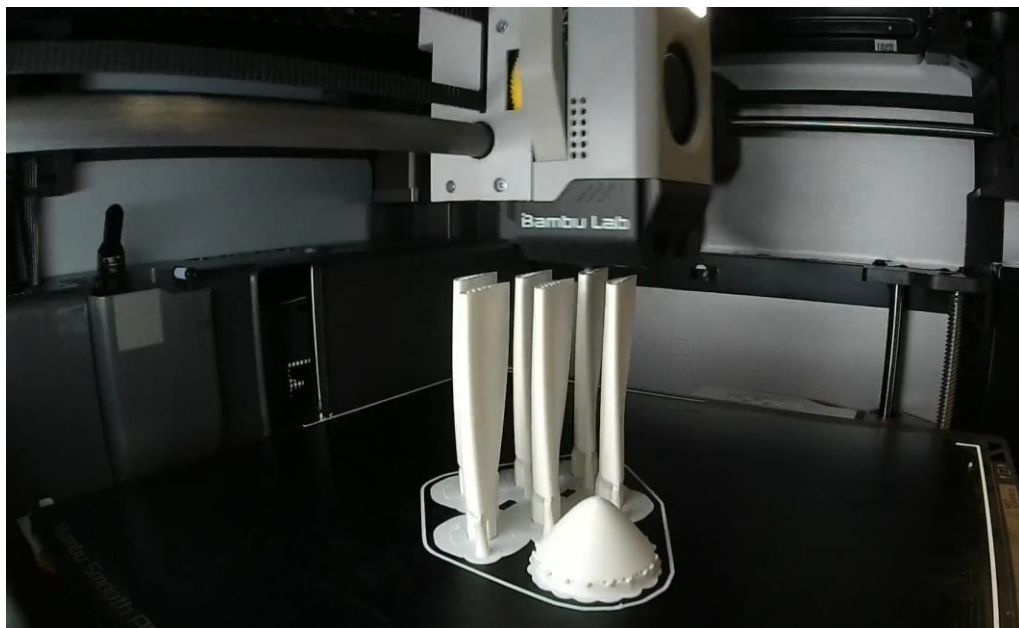


*Slika 4.6 Lopatice u programu Fusion360*



*Slika 4.7 Rotor u programu Fusion360*

Proces printanja prepušten je vanjskoj tvrtki zbog težine obrade filameta i boljim tehničkim uvjetima i mogućnostima. Na slici 7.8 možemo vidjeti prikaz izrade pojedinih lopatica, u 3D printeru "Bambu Lab X1-Carbon".



*Slika 4.8 Proces izrade lopatica i glavčine*

Na slici 7.9 možemo vidjeti rotore koji su izvedeni sa dvije, tri, četiri, pet i šest lopatica. Jedan dio lopatica izrađen je printanjem vertikalno, no zbog izrazito velike lomljivosti, ostatak je isprintan horizontalno.



*Slika 4.9 Rotori vjetroturbine*

#### 4.5 Mjerni instrument

Mjerni instrument je sačinjen od LED digitalnog voltmetra/ampermetra. Ovaj uređaj je iznimno osjetljiv i mjeri napone u rasponu DC 0-2 V te struju u rasponu DC 0-200 mA, što je vrlo bitno jer generator proizvodi vrlo male napone. Raspon je u ovom slučaju manji kako bi smanjili mjernu pogrešku. Mjerna pogreška uređaja iznosi 0.1 % (+- 2 digita).



*Slika 4.10 LED voltmetar/ampermetar*

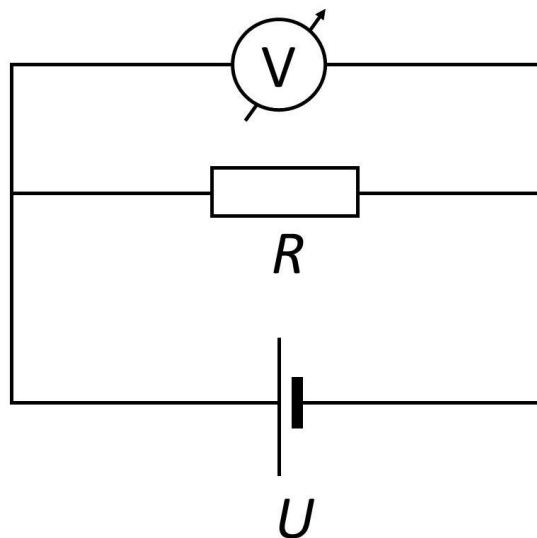
Spajanje ovog uređaja bilo je poprilično jednostavno zbog toga što su strujni krugovi voltmetra i ampermetra odvojeni, sa posebnim ulazom za napajanje. Uređaj je napajan 9 V baterijom no moguće ga je napajati izvorima u rasponu DC 8-24 V. Na slici je prikazana pozadina uređaja. Dok



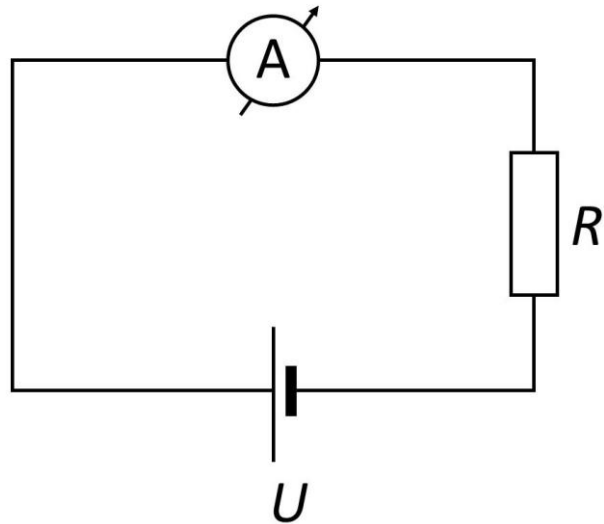
su na slikama 4.12 i 4.13 prikazane sheme spojeva, gdje U predstavlja generator (izvor) dok se R nalazi unutar samog uređaja. U slučaju sheme spoja voltmetra  $R > 300 \text{ k}\Omega$  dok u slučaju spoja s ampermetrom  $R = 1 \Omega$ .



Slika 4.11 Pozadina voltmetar/ampermetra



Slika 4.12 Shema spoja voltmetra



*Slika 4.13 Shema spoja ampermetra*

Kako bi spoj ostao neoštećen i funkcionalan, kutnom brusilicom napravljen je otvor u koji je položen voltmetar/ampermetar. Nakon toga sve je spojeno u jednu cjelinu, te su žice za mjerenje i napajanje izvučene van kutije za lakši pristup. Na slici **4.14** vidimo kako taj uređaj izgleda.

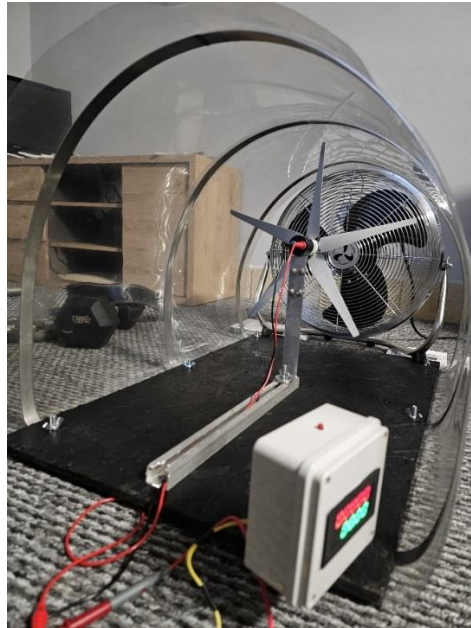


*Slika 4.14 Kompletirani mjerni uređaj*

## 5. MJERENJA I REZULTATI

### 5.1 Postavljanje eksperimenta

Eksperimentni postav se sastoji od generatora s pričvršćenim rotorom, mjernog instrumenta te ventilatora kao izvor vjetra. Ventilator je snage 110 W koji ima tri brzine, što je odlično za simuliranje različitih brzina vjetra. Postavljeni eksperiment možemo vidjeti na slici 5.1.



*Slika 5.1 Postavljeni eksperiment*

Osim već prikazanog mjernog instrumenta bio je potreban i anemometar. Ovaj instrument pomoću malog ventilatora, mjeri brzine vjetra i prikazuje ih u mjernoj jedinici km/h.

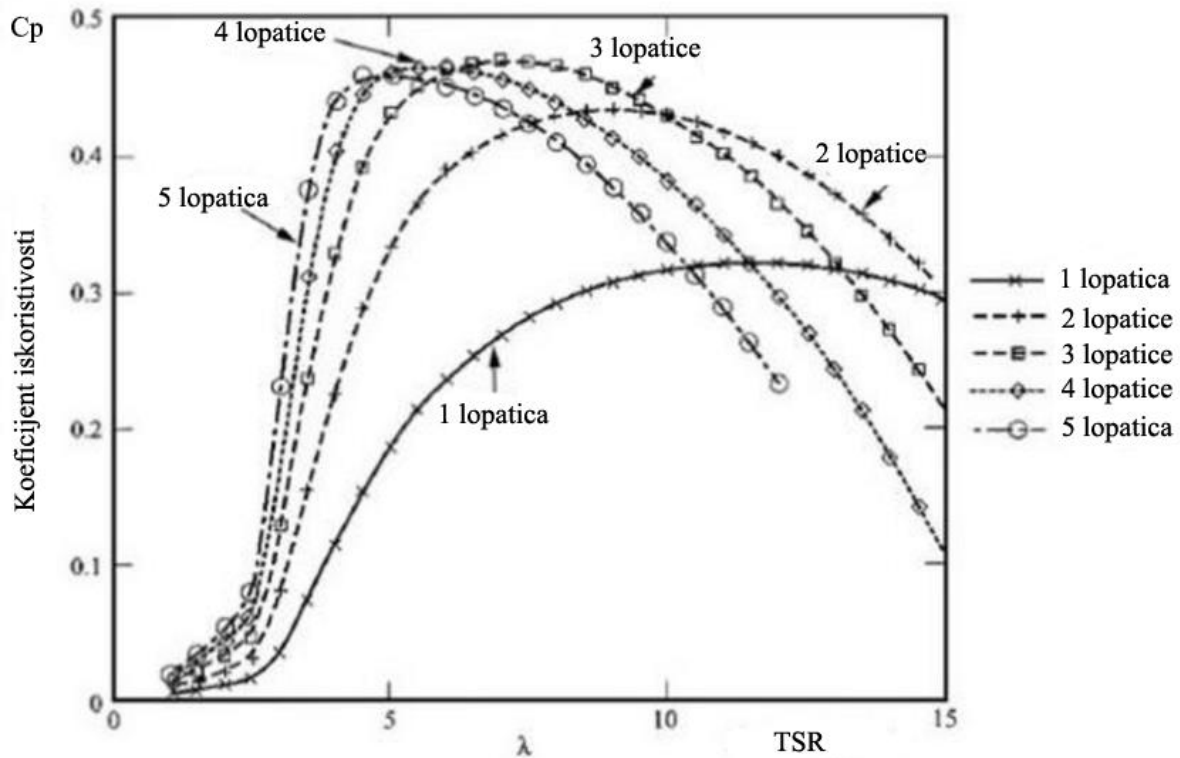


*Slika 5.2 Anemometar*



## 5.2 Postavljanje teze

Ovaj eksperiment trebao bi pokazivati trend rasta izlazne snage povećanjem broja lopatica na rotoru, no smanjenje koeficijenta iskoristivosti ili njegovo stagniranje. Svakim dodavanjem lopatice postotni rast izlazne snage bi trebao biti sve manji.



**Graf 5.3** Utjecaj broja lopatica na performanse [26]

Na grafu 5.3 može se vidjeti promjena koeficijenta iskoristivosti ( $c_p$ ) u odnosu na TSR (eng. *tip speed ratio*). TSR se izračunava kao omjer brzine vrha lopatice ( $v$ ) i brzine vjetra ( $V$ ). Brzina vrha lopatice računa se kao umnožak radijusa ( $r$ ) i kutne brzine rotora ( $\omega$ ).

## 5.3 Provedba mjerenja

Prvi korak bio je izmjeriti tri brzine vjetra anemometrom. Uređaj je postavljen na udaljenosti od nekoliko centimetara, kako bi se smanjila opstrukcija metalnog kućišta ventilatora. U tablici 8.4 možemo vidjeti rezultate tih mjerenja.

Brzina 1	Brzina 2	Brzina 3
19.5 km/h	22.4 km/h	26.8 km/h

**Tablica 8.4** Brzine vjetra

Sljedeći korak bio je mjerenje izlaznog napona i struje mjernim instrumentom. Ponajprije je

provedeno mjerenje na rotoru s tri lopatice za sve tri brzine vjetra, a u nastavku i ostali rotori, ali samo pri najvećoj brzini. Snaga je izračunata pomoću zakona za snagu:

$$P = U \times I \quad (5-1)$$

Snaga se izračunava umnoškom izlaznog napona (U) i struje (I).

	Pri brzini od 19.5 km/h	Pri brzini od 22.4 km/h	Pri brzini od 26.8 km/h
U [mV]	10.6	12.3	13.5
I [mA]	10.4	12.25	13.37
P [ $\mu$ W]	110.24	150.68	180.5

**Tablica 8.5** Rezultati mjerenja turbine s tri lopatice

	2 lopatice	4 lopatice	5 lopatica	6 lopatica
U [mV]	12.2	14.3	15.5	16.2
I [mA]	11.64	14.22	14.77	15.23
P [ $\mu$ W]	142	203.35	228.94	246.73

**Tablica 8.6** Rezultati mjerenja turbina s ostalim brojem lopatica

Kako svi podaci kao što je efikasnost generatora ( $\eta$ ) nisu dostupni, izračunavanje mehaničke snage koju proizvodi turbina nije moguće. To znači da koeficijent iskoristivosti ( $c_p$ ) neće biti poznat, ali može se izračunati trend postotnog rasta izlazne električne snage. Ovaj trend izračunati će se uspoređujući izlaznu električnu snagu svake turbine pri istim uvjetima, potom će se izračunati postotna promjena snage u odnosu na prethodnu vrijednost. Sve vrijednosti biti će računane pri brzini od 26.8 km/h.

$$\text{Postotni rast} = \frac{P_n - P_{n-1}}{P_{n-1}} \times 100\% \quad (5-2)$$

$P_n$  predstavlja izlaznu snagu turbine s većim brojem lopatica, a  $P_{n-1}$  snagu turbine s manjim brojem lopatica.

Broj lopatica	Sa 2 na 3	Sa 3 na 4	Sa 4 na 5	Sa 5 na 6
Postotni rast[%]	27.11	12.66	12.58	7.77

**Tablica 8.7** Postotni rast izlazne električne snage turbine u odnosu na prethodnu

## 5.4 Analiza rezultata

Iz izmjerenih rezultata vidi se kako postotni rast izlazne električne snage opada sa povećanjem broja lopatica. Ovaj trend u potpunosti je u skladu s postavljenom tezom. No može se i vidjeti kako su vrijednosti iznimno male, stoga je postotna razlika veća nego na komercijalnim turbinama.

Kako bi se izračunao  $c_p$  pretpostavljeno je da učinkovitost  $\eta$  iznosi 50% a električna snaga  $P_e = 180.5\mu W = 180.5 \times 10^{-6} W$ . Formulom (5-3) izračunata je stvarna mehanička snaga  $P_t$  koja iznosi  $3.61 \times 10^{-4} W$ .

$$P_t = \frac{P_e}{\eta} \quad (5-3)$$

Koeficijent iskoristivosti ( $c_p$ ) izračunava se kao omjer snage  $P_t$  i snage vjetra  $P_{vj}$  kako možemo vidjeti na formuli (5-4).

$$c_p = \frac{P_t}{P_{vj}} = \frac{P_t}{\frac{1}{2} \times \rho \times A \times v^3} \quad (5-4)$$

Gustoća zraka iznosi  $\rho = 1.293 kg/m^3$ , a površina rotora  $A$  izračunava se kao  $A = r^2\pi$ , gdje je  $r$  polumjer rotora i iznosi 0.19m. Za  $v$  uzima se najbrža brzina vjetra koja iznosi 26.8 km/h = 7.44 m/s.

Izračunati  $c_p$  iznosi  $1.96 \times 10^{-5}$  što je 0.01196%, što je iznimno mali broj. Manja vrijednost vjerojatno proizlazi iz toga što ovaj motor nije namijenjen za toliko niske brzine vrtnje, te je potrebna neka vrsta multiplikatora/mjenjača kako bi uspjeli izmjeriti stvarni koeficijent iskoristivosti.

## 6. ZAKLJUČAK

Izgradnja modela u sklopu ovog završnog rada, skupa sa teorijskom podlogom, pokušala je opisati i predočiti principe rada vjetroagregata s horizontalnom osi. Prikazan je i proces izgradnje mjernog instrumenta, te kako i prema kojim standardima se grade lopatice turbine. Model nije savršen, no pokazuje kako dodavanjem većeg broja lopatica dobivamo sve manji porast električne izlazne snage, što je u skladu s trendom velikih elektrana.

Na temelju ovog eksperimenta može se zaključiti i zašto komercijalne vjetroelektrane koriste turbine sa tri lopatice. Kako su ulazni troškovi za izgradnju jedne vjetroelektrane iznimno veliki, ne bi imalo ekonomskog smisla graditi turbine sa više od tri lopatice.

Ovaj model moguće je nadograditi s dodavanjem multiplikatora na osovinu kako bi se povećala rotacijska brzina generatora. U tom slučaju bilo bi potrebno dodati mjerni instrument koji mjeri na većem mjernom području.

## 7. LITERATURA

- [1] Zachary Shahan, History of wind turbines [online] Dostupno na: <https://www.renewableenergyworld.com/storage/grid-scale/history-of-wind-turbines/#gref> (pristup: 10.7.2024.)
- [2] Edo Jerkić, Povijest vjetroelektrana [online] Dostupno na: <https://www.vjetroelektrane.com/povijest> (11.7.2024)
- [3] <https://www.hops.hr/page-file/CFpDE7OzJY51pjYH087Kj7/izvjestaji-o-proizvodnji-ve-u-rh/HOPS%20%20Godi%C5%A1nji%20izvje%C5%A1taj%20o%20proizvodnji%20VE%20u%20HR%20za%202023.pdf> (25.7.2024.)
- [4] [https://en.wikipedia.org/wiki/Wind\\_power\\_in\\_Denmark](https://en.wikipedia.org/wiki/Wind_power_in_Denmark) (22.7.2024)
- [5] Abdul R. Beig, S.M. Muyeen : Electric Renewable Energy Systems, 2016 [online] Dostupno na: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/horizontal-axis-wind-turbine> (25.7.2024.)
- [6] Abhishiktha Tummala, V. Hari Krishna : Renewable and Sustainable Energy Reviews , 2016 [online] Dostupno na: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/vertical-axis-wind-turbine> (25.7.2024.)
- [7] L.Jerkić : Moderni vjetroagregati i pretvorba energije, 2010 [online] Dostupno na: <https://www.vjetroelektrane.com/moderni-vjetroagregati-i-pretvorba-energije?showall=1>
- [8] [https://gwec.net/wp-content/uploads/2023/04/GWEC-2023\\_interactive.pdf](https://gwec.net/wp-content/uploads/2023/04/GWEC-2023_interactive.pdf) (26.7.2024.)
- [9] [https://gwec.net/wp-content/uploads/2021/06/Croatia\\_Offshore-Wind-Technical-Potential\\_GWEC-OREAC.pdf](https://gwec.net/wp-content/uploads/2021/06/Croatia_Offshore-Wind-Technical-Potential_GWEC-OREAC.pdf) (26.7.2024.)
- [10] <https://windmillstech.com/wind-turbine-components/> (26.7.2024)
- [11] <https://www.reuk.co.uk/wordpress/wind/up-wind-or-down-wind-generator/> (28.7.2024.)
- [12] [https://www.researchgate.net/figure/Different-types-of-Darrieus-rotor-VAWT\\_fig1\\_313893605](https://www.researchgate.net/figure/Different-types-of-Darrieus-rotor-VAWT_fig1_313893605) (28.7.2024.)
- [13] Rupp Carriveau : Advances in Wind Power, 2012. [online] Dostupno na:

[https://www.upct.es/hidrom/publicaciones/monografias/Advances\\_in\\_Wind\\_Power.pdf](https://www.upct.es/hidrom/publicaciones/monografias/Advances_in_Wind_Power.pdf)

(29.7.2024)

[14] <https://www.thecivilengineer.org/news/historic-iranian-windmills-are-still-functional-nowadays> (2.8.2024)

[15] <https://www.theguardian.com/environment/2022/dec/22/james-blyth-scottish-engineer-wind-power> (2.8.2024)

[16] [https://www.researchgate.net/figure/Savonius-Vertical-Axis-Wind-Turbines-20-The-Savonius-rotor-sweeps-an-area-in-vicinity\\_fig5\\_332802724](https://www.researchgate.net/figure/Savonius-Vertical-Axis-Wind-Turbines-20-The-Savonius-rotor-sweeps-an-area-in-vicinity_fig5_332802724) (2.8.2024)

[17] <https://aiswindenergy.co.uk/advantages-and-disadvantages-of-horizontal-axis-and-vertical-axis-wind-turbines/> (29.8.2024)

[18] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Vjetroagregat\\_s\\_vodoravnom\\_osovinom](https://hr.wikipedia.org/wiki/Vjetroagregat_s_vodoravnom_osovinom) (3.9.2024.)

[19] <https://hr.wikipedia.org/wiki/Heron> (3.9.2024.)

[20] <https://www.statista.com/statistics/1475025/wind-electricity-generation-per-person-leading-countries-worldwide/> (3.9.2024.)

[21] <https://discovercleantech.com/ten-gigantic-wind-farms/> (3.9.2024.)

[22] <https://www.independent.co.uk/business/world-s-largest-wind-farm-starts-production-off-yorkshire-coast-b2427196.html> (3.9.2024.)

[23] <https://oie.hr/elektroenergetska-kretanja-u-hrvatskoj-u-2022/> (3.9.2024.)

[24] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468227620303045> (4.9.2024.)

[25] The Annals of “Dunarea de Jos” University of Galati Fascicle IX Metallurgy and Materials Science, 2021. [online] Dostupno na:

[https://www.researchgate.net/publication/351492477\\_Analysis\\_of\\_the\\_Behavior\\_in\\_the\\_Wind\\_Tunnel\\_of\\_an\\_Experimental\\_Model\\_of\\_Savonius\\_with\\_Interlocking\\_Cups\\_with\\_the\\_Classic\\_Ones\\_with\\_2\\_3\\_and\\_4\\_Semi-Cylindrical\\_Cups#pf3](https://www.researchgate.net/publication/351492477_Analysis_of_the_Behavior_in_the_Wind_Tunnel_of_an_Experimental_Model_of_Savonius_with_Interlocking_Cups_with_the_Classic_Ones_with_2_3_and_4_Semi-Cylindrical_Cups#pf3) (4.9.2024)

[26] Kehinde Adeseye Adeyeye et al 2021 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 801 012020 [online] Dostupno na: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/801/1/012020/pdf> (4.9.2024)

[27] D. Dragomir, N. Golovanov, P. Postolache and C. Toader, "The connection to the grid of wind turbines," *2009 IEEE Bucharest PowerTech*, Bucharest, Romania, 2009, pp. 1-8, doi: 10.1109/PTC.2009.5282085. [online] Dostupno na: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5282085> (4.9.2024)

## 8. SAŽETAK

Ovaj završni rad istražuje princip rada vjetroelektrana s horizontalnom osi, njihove dijelove te proces pretvorbe energije vjetra u električnu energiju. Kroz povijesni pregled i analizu različitih tipova vjetroagregata ( s horizontalnom i vertikalnom osi), obrađuju se prednosti i nedostaci svakog sustava. Rad se također fokusira i na izradu fizičkog modela vjetroagregata s horizontalnom osi, koji uključuje izradu zračnog tunela, izradu mjernog instrumenta, dizajn i izradu rotora, te postavljanje eksperimenta za mjerenje izlaznih podataka. Izlazna mjerenja i izračuni pokazali su trend smanjenja postotnog rasta snage s povećanjem broja lopatica, što je u skladu s očekivanjima. Cilj rada također je bio, na temelju analize rezultata mjerenja, zaključiti zašto su turbine s tri lopatice optimalne za komercijalnu primjenu.

**Ključne riječi:** vjetroelektrana, vjetroagregat, mjerni instrumenti, pretvorbe energije, rotor, HAWT, VAWT



## 9. ABSTRACT

This thesis explores the working principle of horizontal axis wind turbines, their components, and the process of converting wind energy into electrical energy. Through a historical review and analysis of different types of wind turbines (horizontal and vertical axis), as well as discussing pros and cons of each system. The thesis also focuses on the creation of a physical model of a horizontal-axis wind turbine, which includes the construction of a wind tunnel, the creation of a measuring instrument, the design and manufacture of the rotor, and setting up an experiment for measuring output data. The output measurements and calculations showed a trend of decreasing percentage in power growth with the increase in the number of blades, which aligns with expectations. The aim was also to determine, based on the analysis of measurement results, why three-blade turbines are optimal for commercial application.

**Keywords:** wind power plant, wind turbine, measuring instruments, energy conversion, rotor, HAWT, VAWT