

# Projekt malog vjetroagregata

---

**Tomišić, Simon**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2023**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Pula / Sveučilište Jurja Dobrile u Puli**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:137:402313>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-23**



*Repository / Repozitorij:*

[Digital Repository Juraj Dobrila University of Pula](#)



Sveučilište Jurja Dobrile u Puli  
Tehnički fakultet u Puli



**Simon Tomišić**

**Projekt malog vjetroagregata**

Diplomski rad

Pula, Rujan, 2022.

Sveučilište Jurja Dobrile u Puli  
Tehnički fakultet u Puli



**Simon Tomišić**

**Projekt malog vjetroagregata**

Diplomski rad

**JMB: 9998000133, izvanredni student**

**Studijski smjer: Diplomski studij strojarstvo**

**Predmet: Hidraulički strojevi i vjetroturbine**

**Znanstveno područje: Tehničke znanosti**

**Znanstveno polje: Strojarstvo**

**Znanstvena grana: Opće Strojarstvo**

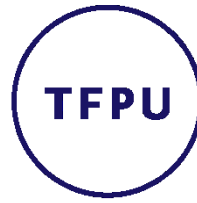
**Mentor: doc.dr.sc. Marko Kršulja**

**Komentor: dr.sc. Damir Karabaić, pred.**

Pula, Rujan, 2022.

**doc.dr.sc. Marko Kršulja**

(Ime i prezime nastavnika)



Tehnički fakultet u Puli

**Hidraulički strojevi i vjetroturbine**

(Predmet)

**Sveučilište Jurja Dobrile u Puli**

**TEHNIČKI FAKULTET U PULI**

**ZADATAK TEME DIPLOMSKOG RADA**

**Pristupnik:** Simon Tomišić

**MBS:** 9998000133

Studentu sveučilišnog diplomskog studija Tehničkog fakulteta u Puli izdaje se zadatak za diplomski rad – tema diplomskog rada pod nazivom:

**PROJEKT MALOG VJETROAGREGATA**

**Sadržaj zadatka:** Izložiti osnovne principe projektiranja malog vjetroagregata. Napraviti projekt malog vjetroagregata za kućanstvo na području općine Ližnjan, Istarska županija, u blizini rta Marlera. Vjetroagregat treba zadovoljiti pola godišnje potrošnje kućanstva koja iznosi za cijelu godinu 8000 kWh. Projekt treba napraviti u skladu sa smjernicama standarda IEC 61400-2 „Wind turbines – Part 2: Design requirements for small wind turbines“.

Rad obraditi sukladno odredbama Pravilnika o diplomskom radu Sveučilišta u Puli.

**Izvanredni studij Strojtarstvo**

**Pula, rujun 2023.**

**Potpis mentora:** \_\_\_\_\_

**Potpis komentora:** \_\_\_\_\_



### IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Ja, dolje potpisani SIMON TOMIŠIĆ, kandidat za magistra INŽENJERA STROJARSTVA ovime izjavljujem da je ovaj Diplomski rad rezultat isključivo mogega vlastitog rada, da se temelji na mojim istraživanjima te da se oslanja na objavljenu literaturu kao što to pokazuju korištene bilješke i bibliografija. Izjavljujem da niti jedan dio Diplomskog rada nije napisan na nedozvoljeni način, odnosno da je prepisan iz kojega necitiranog rada, te da ikoji dio rada krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem, također, da nijedan dio rada nije iskorišten za koji drugi rad pri bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili radnoj ustanovi.

Student

Simon Tomišić

U Puli, RUJNA, 2023.



### IZJAVA O KORIŠTENJU AUTORSKOG DJELA

Ja, SIMON TOMIŠIĆ dajem odobrenje Sveučilištu Jurja Dobrile u Puli, kao nositelju prava iskorištavanja, da moj diplomski rad pod nazivom PROJEKT MALOG VJETROAGREGATA

koristi na način da gore navedeno autorsko djelo, kao cjeloviti tekst trajno objavi u javnoj internetskoj bazi Sveučilišne knjižnice Sveučilišta Jurja Dobrile u Puli te kopira u javnu internetsku bazu završnih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice (stavljajući na raspolaganje javnosti), sve u skladu s Zakonom o autorskom pravu i drugim srodnim pravima i dobrom akademskom praksom, a radi promicanja otvorenoga, slobodnoga pristupa znanstvenim informacijama.

Za korištenje autorskog djela na gore navedeni način ne potražujem naknadu.

U Puli, RUJNA, 2023.

Potpis

Simon Tomišić

## SAŽETAK

U ovome radu opisano je nastajanje vjetra i korištenje vjetra kao izvora energije, dan je način mjerenja brzine vjetra i prikazani su instrumenti kojima se mjeri. Prikazane su osnovne karakteristike vjetra kao izvora energije, te su izvedene osnovne jednadžbe pretvorbe vjetra. Prikazan je odnos brzine vjetra sa lokacijom, vegetacijom, te definirana je ovisnost brzine vjetra s obzirom na visinu. Zatim, objašnjen je način rada vjetroturbine, ovisnost oblika lopatica na karakteristike same turbine, također dan je pogled na podjelu vjetroturbina s obzirom na snagu, položaj vratila, i broj lopatica.

U drugom dijelu rada napravljen je proračun koristeći se smjericama IEC 61400-2 standarda, na način da je proračun podijeljen prema nekoliko situacija u kojima bi se vjetroturbina mogla pronaći. Također, napravljen je proračun naprezanja lopatica i vratila vjetroturbine. Uz proračun vjetroturbine, izabrana je konstrukcija tornja koja je također mehanički i dinamički proračunata. Na kraju obavljen je odabir generatora vjetroatagregata, uz definiranje sheme spajanja.

## **SUMMARY**

This paper describes the formation of wind and exploitation of wind as a source of energy, also the paper describes the methods of wind speed measurement and the tools with which is measured. The paper shows the main characteristics of wind as a source of energy, and derives general equations of wind energy conversion. The paper displays the relation between wind speed and location, vegetation, and defines the dependency of wind speed on the height from ground. Subsequently, the paper explains the mode of functionality, the dependency of aerofoil shape on the wind turbine characteristics, also a view is given on wind turbine classification considering the power of said wind turbine, the axis position, and the number of blades.

In the second part of the paper, a calculation is made using guidelines from IEC 61400-2 standard, in a way so the calculation is separated into load cases in which the turbine could find itself in. The wind turbine design in the paper is referring on blade and the axis of said wind turbine, also in this paper the design and selection of tower construction was made. At the end the selection of the generator was made with the definition of connection scheme.



## SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. POVIJEST ENERGIJE VJETRA.....	3
3. NASTANAK I KARAKTERISTIKE VJETRA .....	5
3.1. Coriolisova sila.....	6
3.2. Lokalni utjecaji .....	7
3.3. Sila trenja – smicanje slojeva .....	8
3.4. Turbulencija vjetra.....	9
3.5. Efekt ubrzanja.....	12
3.6. Vremenska promjena.....	12
4. MJERENJA VJETRA.....	14
4.1. Mjerna oprema.....	15
4.2. Statistički pokazatelji resursa energije vjetra .....	19
4.2.1 Srednja godišnja brzina vjetra.....	20
4.2.2. Ruža vjetrova.....	21
4.3. Diskretni histogram brzina vjetra .....	23
5. OSNOVE PRETVORBE ENERGIJE VJETRA.....	25
5.1. Snaga vjetra.....	25
5.2. Parametri rada turbine .....	26
5.3. Krivulja snage .....	29
5.4. Podjela vjetroelektrana.....	30
5.4.4. Vjetroturbine sa vertikalnom osovinom.....	30
5.4.5. Vjetroturbine sa horizontalnom osovinom .....	31
5.5. Komponente vjetroagregata.....	31
6. AERODINAMIKA VJETROTURBINA .....	34
6.1. Aero-profil.....	34
6.2. Uzgon i sila otpora aero-profila .....	36
7. PRORAČUN MALOG VJETROAGREGATA .....	36
7.1. Lokacija .....	37
7.2. Osnovni parametri vjetroagregata .....	37
7.3. IEC 61400-2.....	40
7.4. Jednostavni model naprezanja.....	41
7.4.1. Režim rada - slučaj A: Normalni Rad .....	44
7.4.2. Režim rada - slučaj B: Zakretanje .....	45

7.4.3. Režim rada - slučaj C: Pogreška Zakretanja .....	46
7.4.5. Režim rada - slučaj E: Maksimalna Brzina Rotacije .....	46
7.4.6. Režim rada - slučaj F: Kratak Spoj Električnih Instalacija .....	47
7.4.7. Režim rada - slučaj H: Opterećenje pri Zastoju .....	47
7.5. Proračun naprezanja i faktori sigurnosti .....	48
7.5.1. Nazivna naprezanja komponenti .....	48
7.5.2. Nazivno naprezanje za slučaj A: Normalni rad .....	51
7.5.3. Nazivno naprezanje za slučaj B: Zakretanje .....	52
7.5.4. Nazivno naprezanje za slučaj C: Greška u Zakretanju .....	52
7.5.5. Nazivno naprezanje za slučaj D: Maksimalni potisak .....	52
7.5.6. Nazivno naprezanje za slučaj E: Maksimalna brzina okretanja .....	52
7.5.7. Nazivno naprezanje za slučaj F: Kratki Spoj Električnih Instalacija .....	52
7.5.8. Nazivno naprezanje za slučaj H: Opterećenje pri Zastoju .....	53
8. TORANJ .....	54
9. ELEKTRIČNI SUSTAV .....	62
9.1. Generatori za male turbine .....	63
10. ZAKLJUČAK .....	66
11. LITERATURA .....	67
12. PRILOZI .....	69
12.1. Popis slika .....	69
12.2. Popis tablica .....	70
12.3. Slike modelirane lopatice .....	71
12.4. Podaci o generatoru .....	72

## 1.UVOD

Iskorištavanje vjetra kao resursa seže još u doba antike, kada su naš predci postavili jedra na svoje brodove i time omogućili plovljenje morem koristeći energiju vjetra. Tada je to bio revolucionarni način plovljenja, iako rijetko pouzdan, omogućio je prijenos robe plovnim putevima, te time uvelike jačao trgovinu i transport. Zatim pojavile su se i prve vjetrenjače, koje su iskoristavale energiju vjetra primarno za mljevenje žitarica, a kasnije i za agrokulturu. Prvi vjetroagregat koji je proizveo električnu energiju bio je izum profesora James-a Blyth-a, u Škotskoj 1887 godine.

Vjetar je pretežno vodoravno strujanje zraka i može se ga pronaći na cijeloj planeti Zemlji, i nastaje zbog razlike tlakova između dva područja. Razliku tlaka uzrokuje različita zagrijanost dva područja, te poštujući pravila termodinamike kada se zrak (u ovom slučaju) zagrije, njegova gustoća se mijenja, te on postaje lakši. U tom trenutku dolazi do razlike tlaka između dva područja budući da je gušći zrak na području do rjeđeg, te gušći zrak se „premješta“ kako bi se smanjila razlika tlaka. Stoga možemo reći da energija vjetra i solarna energija nastaje od istog uzroka, a to je Sunce.

Budući da su zalihe fosilnih goriva sve manje, a klimatske promjene sve izraženije, topljenje ledenjaka zbog visoke temperature čiji su uzroci staklenički plinovi, potrebno je alternativno rješenje pretvorbe električne energije, te obnovljivi izvori energije uz nuklearnu energiju su za sada najčišći način dobivanja energije. Kretajući se u smjeru obnovljivih izvora i eksploatacije energije vjetra, moguće je postaviti vjetroagregate koji bi mogli napajati naselja i ostale lokacije, kojima je pristup gradskoj mreži onemogućen, a pozicionirani su na povoljnoj lokaciji za eksploataciju.

Korištenje energije vjetra je rastući trend u svijetu, i najbrže rastući ogranak proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora, što potvrđuje podatak da je u zadnjih desetak godina ukupna instalirana svjetska snaga iz vjetroelektrana porasla za deset puta. Najveći proizvođači električne energije iz energije vjetra je Danska sa 1,070 W proizvedene električne energije po glavi stanovnika u 2020. godini, za kojom slijedi Švedska sa 933 W proizvedene električne energije po glavi stanovnika u 2020. godini.[22]

U ovom radu opisati će se kako nastaje vjetar, što karakterizira vjetar i energiju vjetra, zatim dati će se pogled na mjerne instrumente, načine mjerenja, statističke zapise smjera i brzine vjetra. Također dati će se pogled na zapise o učestalosti strujanja vjetra koristeći grafičke dijagrame. Opisati će se način rada vjetroagregata, važne parametre za rad, oblik i funkciju lopatica, te dati će osnovne izraze za izračunavanje visinskog profila vjetra, snage i ostale parametre. Cilj ovog rada je izvesti proračun manjeg vjetroagregata prema IEC 61400-2 standardu, koji opisuje proračun kroz slučajeve opterećenja, tj. različita stanja okoline u kojima bi vjetroagregat trebao strukturalno postojati. Uz proračun rotora vjetroagregata, ovaj rad će dokumentirati proračun za toranj vjetroagregata osmerokutnog poprečnog presjeka.

## 2. POVIJEST ENERGIJE VJETRA

Čovjekovi napori da zauzdaju energiju vjetra datiraju nazad do drevnih vremena, kada je koristio jedra kako bi pokrenuo brodove i čamce. Kasnije energija vjetra je služila čovječanstvu tako da je pokretala mlin za mljevenje žitarica i pumpu vode. Tijekom njene transformacije, od grubih i teških uređaja do današnjih sofisticiranih strojeva, tehnologija iskorištavanja vjetra je prošla kroz mnoge faze razvoja.

Postoji neslaganje o nastanku koncepta korištenja vjetra za dobivanje mehaničke snage. Neki misle da koncept potječe iz drevnog Babilona. Babilonski car Hammurabi je planirao koristiti energiju vjetra za njegov projekt navodnjavanja za vrijeme sedamnaestog stoljeća prije Krista.[1] Drugi dio misli da je mjesto rođenja vjetrenjača u Indiji. U Arthasastru, dijelo napisano u Sanskritu čiji je autor Kautiliya za vrijeme četvrtog stoljeća prije Krista gdje su vidljivi opisi podizanja vode sa izumima koje pogoni vjetar. Međutim ne postoje zapisi koji bi dokazali da su ovi koncepti bili stvarni.

[2]

Najmlađi dokumentirani zapis o izradi vjetrenjače datira nazad sve do dvjestote godine prije Krista. U ovo vrijeme Perzijanci su koristili vjetrenjače za mljevenje žitarica. To su bile vjetrenjače sa vertikalnom osovinom i lopaticama izrađenim od snopova trske ili drva. Kamen za mljevenje je bio spojen na vertikalnu osovinu. Veličina jedra su bila određena materijalom korištenim pri izradi, obično pet metara duga i devet metara visoka. Za vrijeme trinaestog stoljeća, mljevenje žitarica je bilo popularno u većem dijelu Europe. Francuzi su usvojili ovu tehnologiju već u 1105. godini, a Englezi do 1191. godini poslije Krista. Za razliku od Perzijskih vjetrenjača sa vertikalnom osovinom, Europski mlinovi su imali horizontalnu osovinu koja je prikazana na slici 1. Toranj vjetrenjače je bio okrugao ili u obliku mnogokuta i napravljen od drva ili cigle, a rotor se je ručno orijentirao ka vjetru. Vjetrenjača se je štitila od brzih vjetrova tako da se rotor okretao van vjetra ili tako da su se uklonila jedra sa rotora. Nizozemci su bili pioniri u izrađivanju ovakvih vjetrenjača, napravljeno je mnogo poboljšanja na samom dizajnu vjetrenjače. Rotori su bili izrađeni od grubih profila lopatica kako bi se povećala efikasnost. Osim za mljevenje žitarica, vjetrenjače su bile korištene i za isušivanje močvarnih područja u Nizozemskoj.[2]

Sredinom 18. stoljeća, preko nizozemskih doseljenika, koncept Nizozemskih vjetrenjača stiže u Ameriku gdje se dalje razvija za potrebe pumpanja vode, uglavnom

radi zalijevanja polja. Američke vjetrenjače sastojale su se od više metalnih lopatica i imale su manju površinu rotora. Bile su veoma dobre za svoju namjenu i široko rasprostranjene (preko 6 miliona u Americi u periodu od 1850. – 1930. godine) [3]



Slika 1. Drevna vjetrenjača na Britanskom otočju

Prvu vjetroturbinu koja je korištena za generiranje električne energije napravio je Danac Poul la Cour 1891. godine. Zanimljivo je da je Poul la Cour koristio ovako proizvedenu električnu energiju za elektrolizu vode i na taj način je proizvodio vodik za plinske lampe, koje su tada korištene u lokalnoj školi. Danas se može reći da je on bio sto godina ispred svoga vremena, jer su suvremene vizije razvoja vjetroenergetike povezane upravo sa korištenjem vjetrogeneratora za proizvodnju Vodika u udaljenim

vjetrovitim lokacijama na sjevernom moru. Nakon prvog vjetrogeneratora počinje njegov dalji razvoj i širenje:[3]

- 1910. postoji oko sto vjetrogeneratora u Danskoj.
- 1925. počinje komercijalna upotreba na američkom tržištu.
- 1931. prva turbina snage 100 kW u Rusiji.
- 1941. u Americi je puštena u rad vjetroturbina snage 1250 kW. Imala je rotor promjera 53 m montiran na tornju visine 34 m i mogla je ostvariti konstantnu brzinu okretaja zakretanjem lopatica. Nakon završetka drugog svjetskog rata, ekonomija u elektroenergetici se okreće velikim termoelektranama na fosilna goriva i velikim hidroelektranama, tako da vjetrogeneratori, kao i ostali mali izvori, postaju nekonkurentni i polako prelaze u zaborav.[3]

Energetska kriza iz 1973. godine, a kasnije i sve veći ekološki problemi vezani uz sagorijevanje fosilnih goriva, ponovo populariziraju obnovljive izvore energije i početkom devedesetih godina vjetrogeneratori doživljavaju renesansu. Velika financijska ulaganja i jasna opredijeljenost razvijenih država da stimuliraju proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora su rezultirale izuzetno brzim razvojem vjetroenergetike.[3]

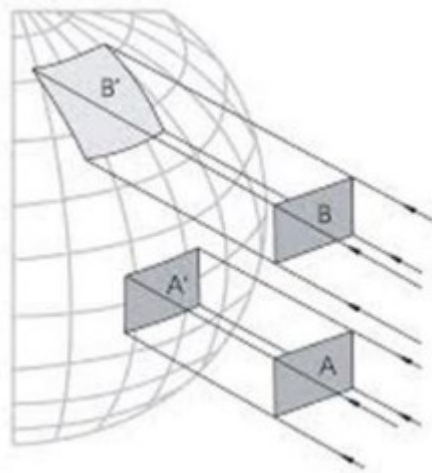
### **3. NASTANAK I KARAKTERISTIKE VJETRA**

Vjetar je pretežno vodoravno strujanje zraka, relativno prema Zemljinoj površini, određeno smjerom (stranom svijeta odakle vjetar puše) i brzinom, odnosno jakošću.  
[4]

Postoje dva glavna faktora u globalnom strujanju zraka i oni su Sunčevo zračenje, rotacija Zemlje i atmosfere. Sezonska promjena se događa zbog nagnutosti Zemljine osi u odnosu na ravninu kretanja Zemlje oko Sunca.[5]

Planeta Zemlja primi oko  $1.7 \times 10^{14}$  kW snage od Sunca u obliku Sunčevog zračenja. Takvo zračenje zagrijava atmosferski zrak. Veći intenzitet grijanja će biti na ekvatoru ( $0^\circ$  zemljopisne širine) buću da je Sunce direktno iznad. Zrak oko polova će biti hladniji, jer kut pod kojim Sunčevo zračenje pada na Zemljinu površinu je oštiri, ova pojava je vidljiva na slici 2. Gustoća zraka se smanjuje sa povećanjem temperature, stoga se lakši zrak sa ekvatora podiže do određene visine u atmosferu, te se širi. Takva pojava uzrokuje pad tlaka na tom području, koje privlači hladniji zrak sa polova prema ekvatoru

kako bi se tlak izjednačio. Opisano kretanje zraka naziva se vjetar. "C"



Slika 2 Kut upada Sunčevih zraka na Zemljinu površinu

Prema tome, vjetar nastaje zbog gradijenta tlaka što je posljedica nejednakog grijanja Zemljine površine od strane Sunca. Budući da strujanje zraka nastaje zbog zagrijavanja Zemljine površine, energija vjetra je zapravo indirektan oblik Sunčeve energije. Na taj način, jedan do dva posto ukupnog sunčevog zračenja se pretvara u energiju vjetra. [2]

Vjetar opisan u prijašnjem tekstu, čiji je uzrok razlika temperature naziva se geostrofički vjetar ili globalni vjetar. Globalni vjetrovi, na koje ne utječe površina Zemlje, nalaze se na većim visinama.

### 3.1. Coriolisova sila

Rotacija Zemlje uzrokuje pojavu koja se zbiva blizu Zemljine površine koja se naziva Coriolisova sila. Kod utjecaja Coriolisove sile vjetar se kreće gotovo paralelno s izobarama, što znači da vjetrovi na sjevernoj polutki teže rotaciji u smjeru kazaljke na satu, dok na južnoj polutki vjetrovi teže kretanju u smjeru suprotno od kazaljke na satu, kao što je prikazano na slici 3.[2]

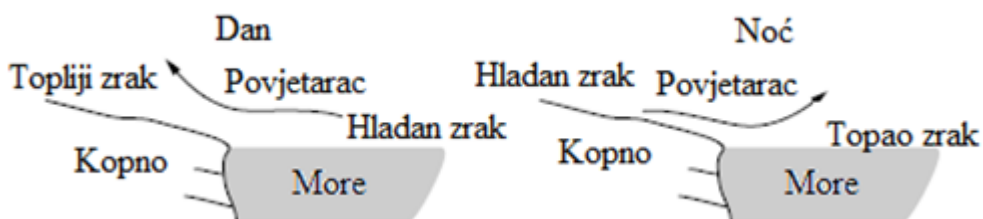




Slika 3. Posljedica djelovanja Coriolisove sile

### 3.2. Lokalni utjecaji

Promjene u brzini i smjeru vjetra relativno blizu površine zemlje, do 100 metara iznad tla, bitnije su kada se razmatra pretvorba energije vjetra. U ovom području, na ponašanje vjetra dalje utječe nekoliko parametara, primjerice kopneni i morski povjetarci. Tijekom dana u ljetnom posebice u ljetnom periodu tlo se više zagrijava od mora, te kao posljedica zrak iznad kopna se diže i formira niskotlačno područje. Ova pojava postiže da hladniji zrak sa mora struji prema kopnu kako bi se izjednačio tlak između susjednih područja, kao što je prikazano na slici 4.[2]



Slika 4. Lokalni vjetrovi

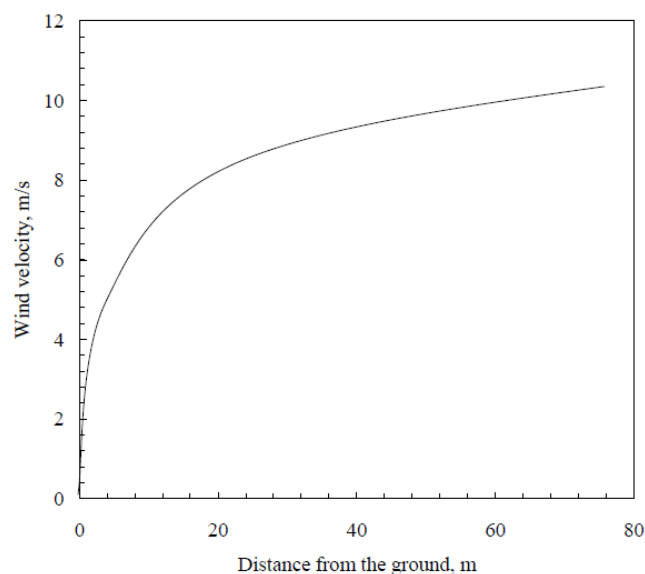
U planinskim dolinama, zrak iznad tla se zagrijava i penje uz padinu kroz dan. Tada se područje koje zauzimao topliji zrak, zamjenjuje sa hladnijim zrakom, iz čega nastaju

dolinski vjetrovi. Kroz noć, strujanje zraka je od planine prema padini, i on se naziva planinski vjetar. Često ova pojava može uzrokovati snažan vjetar.[2]

### 3.3. Sila trenja – smicanje slojeva

Strujanje zraka iznad tla je smanjeno zbog otpora trenja na koje utječe hrapavost Zemljine površine. Otpor može nastati zbog vegetacije, reljefa, kuća, zgrada i drugih struktura koje se nalaze na površini tla. Teoretski brzina vjetra tik iznad tla bi trebala biti nula, te se brzina bitno povećava do visine od 20 metara, iznad koje je utjecaj hrapavosti tla prilično slabašan, primjerice tipičan vertikalni profil vjetra je prikazan na slici 5.[2]

Stopa povećanja brzine u ovisnosti sa visinom se povećava ovisno o hrapavosti terena. Prisutnost guste vegetacije kao što su plantaže, šume, i grmlje znatno smanjuju brzinu vjetra. Hrapavost tla se uobičajeno prikazuje klasom hrapavosti ili visinom hrapavosti. Visina hrapavosti površine može biti blizu nule (površina mora) ili čak do 2 (centar grada). Tipične vrijednosti su 0.005 za ravne i glatke terene, 0.025-0.1 za otvorene pašnjake, 0.2-0.3 za usjeve, 0.5 do 1 za voćnjake i grmlje, i 1 do 2 za šume, gradske centre itd.[2]



Slika 5. Promjena brzine vjetra u odnosu na visinu

Visina hrapavosti je važan faktor koji se razmatra pri proračunu vjetroelektrana. Ukoliko se proračunava vjetroelektrana promjera 30 metara, te je visina tornja 40 metara, montirana na terenu prikazanom na slici 5., vrh lopatice u donjoj poziciji se

nalazi na visini od 25 metara iznad tla. Na sličan način, na krajnjoj gornjoj poziciji, vrh lopatice bi se nalazio na 55 metara iznad tla. Prema tome, znajući da su brzine vjetra na tim visinama različite, može se zaključiti da bi sile i dostupna snaga značajno varirale tijekom rotacije lopatica. Efekt ove pojave se može smanjiti povećanjem visine tornja vjetroelektrane.[2]

Podatke o vjetru sakupljaju meteorološke stanice, čiji senzori se mogu postaviti na razne visine. U većini slučajeva, podaci se sakupljaju na visini od 10 metara prema prijedlozima Svjetske Meteorološke organizacije (WMO). Pri projektiranju vjetroelektrane, potreban je podatak o brzini dostupnog vjetra u visini rotora. Prema prikupljenim podacima na određenim visinama može se izvesti brzina vjetra na potrebnu visinu ovisno o visini hrapavosti terena.[2]

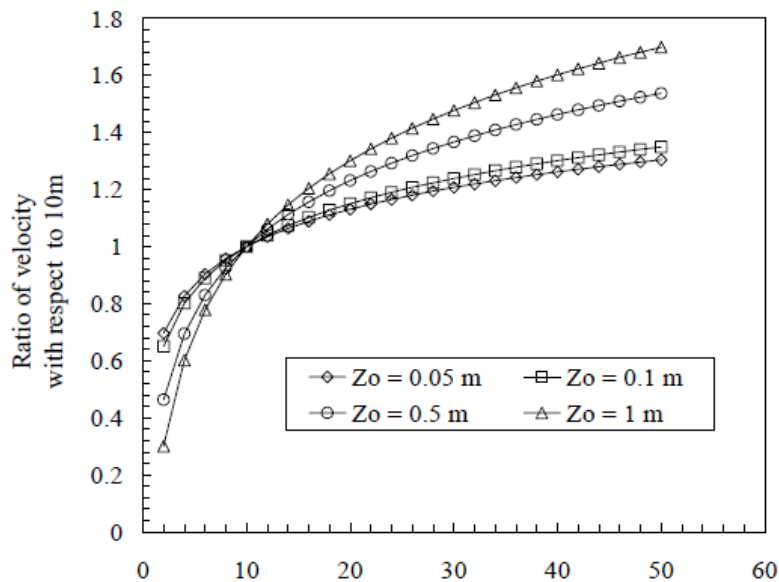
Zbog efekta graničnog sloja, brzina vjetra se logaritmički povećava sa visinom. Ukoliko su podaci o vjetru dostupni na visini  $Z$  i visina hrapavosti iznosi  $Z_0$ , tada je brzina na visini  $Z_R$  dana izrazom: [6,7]

$$V(Z_R) = V(Z) \frac{\ln(Z_R/Z_0)}{\ln(Z/Z_0)} \quad (3.3.1)$$

Gdje su  $V(Z_R)$  i  $V(Z)$  brzine na visinama  $Z_R$  i  $Z$ . Što znači da ako je izmjerena brzina vjetra na visini od 10 metara  $7 \text{ m/s}$  i ako visina hrapavosti iznosi  $0.1$ , brzina vjetra na visini od 40 metara iznad tla iznosit će  $9.1 \text{ m/s}$ . Potrebno je primijetiti da je dostupna snaga na visini od 40 metara 2.2 puta veća u odnosu na dostupnu snagu na visini od 10 metara. Brzine vjetra na pojedinim visinama određene su visinama hrapavosti, čija ovisnost je prikazana na slici 6.[2]

### 3.4. Turbulencija vjetra

Brzina i smjer vjetra se mijenja prolazeći preko hrapavog terena i prepreka kao što su građevine, drveća i kamenje. Uzrok ove pojave je nastajanje turbulentnog strujanja vjetra koja je prikazana na slici 6. Prisutnost turbulencije u strujanju ne samo da ograničava dostupnost snage u vjetru, nego i povećava naprezanja na dijelovima vjetroturbine.[2]

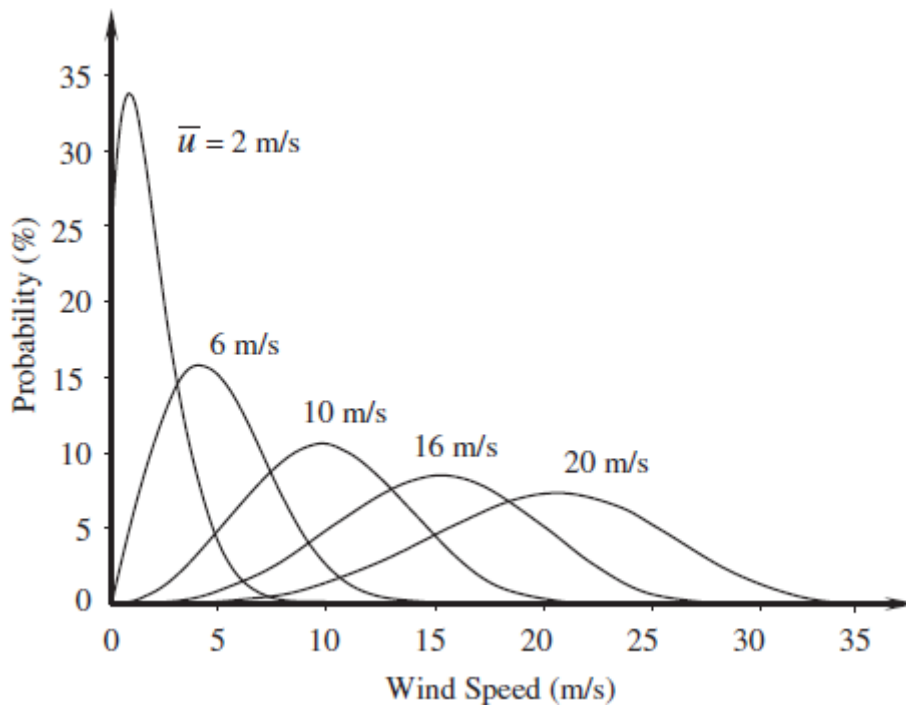


Slika 6. Ovisnost brzine ovisno o visini hrapavosti terena

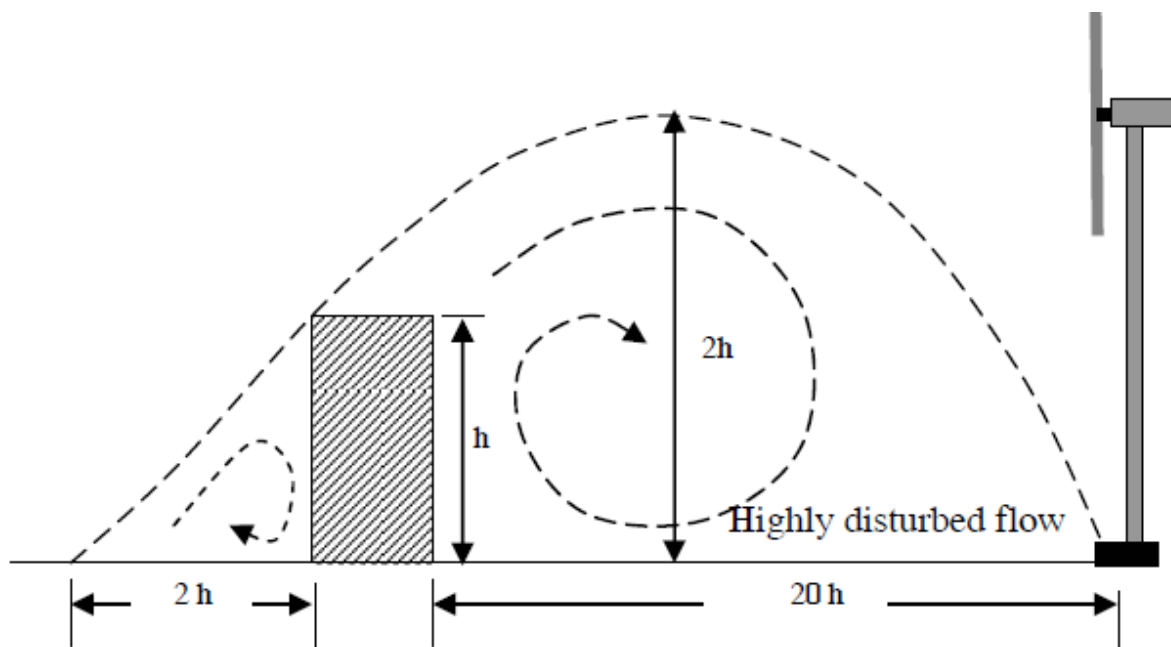
Variranje brzine vjetra na određenoj lokaciji se najbolje može opisati Weibull distribucijom[8], koja opisuje vjerojatnost različitih srednjih vrijednosti brzine vjetra na određenom području za određen period vremena. Funkcija gustoće vjerojatnosti Weibullove varijable  $\bar{u}$  iznosi:[9]

$$f(x) = \begin{cases} \frac{k}{\lambda} \left(\frac{\bar{u}}{\lambda}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{\bar{u}}{\lambda}\right)^k\right) & \bar{u} \geq 0 \\ 0, & \bar{u} \leq 0 \end{cases} \quad (3.4.1)$$

gdje je  $\lambda$  faktor blisko povezan sa srednjom vrijednosti brzine vjetra, i  $k$  faktor oblika koji se odnosi na širinu mjerenja vrijednosti distribucije. Ova dva parametra mogu se odrediti statističkom analizom mjerene brzine vjetra na lokaciji. Kao primjer Weibullove distribucije za različite srednje brzine vjetra dana je slika 7. [9]



Slika 7 Weibull-ova distribucija za različite srednje vrijednosti brzine vjetra



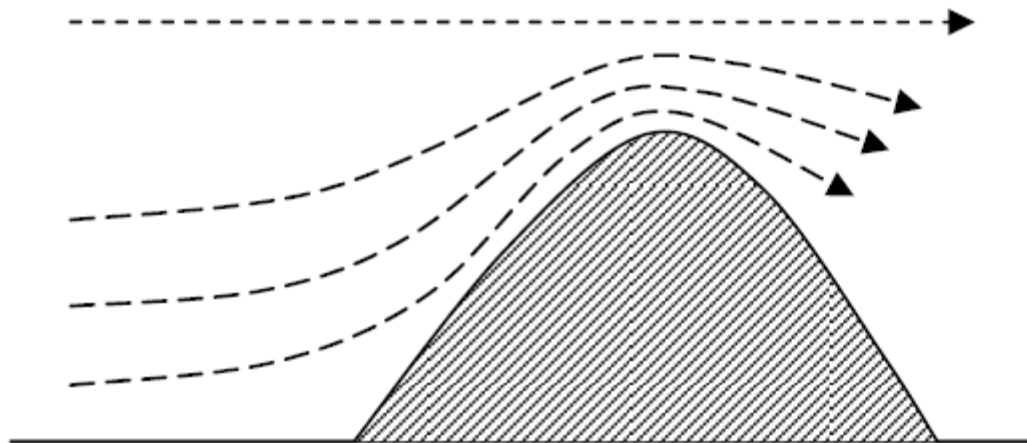
Slika 8 Utjecaj prepreke na turbulencije

Intenzitet turbulencije ovisi o veličini i obliku prepreke. S obzirom na prirodu pojave, turbulencije mogu biti do 2 puta veće od visine prepreke uz vjetar i 10 do 20 puta veće niz vjetar. U vertikalnom smjeru pojavu turbulencije se može očitati od 2 do 3 puta više od visine prepreke. Tim rečeno, pri odabiru lokacije vjetroturbine potrebno je uzeti u obzir opisane karakteristike turbulencije.[2]

### 3.5. Efekt ubrzanja

Dok visoke planine mogu skrenuti ili blokirati vjetar, mala brda mogu povećati brzinu samog vjetra.[10] Razlog ubrzavanja vjetra pri strujanju je stiskanje slojeva vjetra pri strujanju iznad brda kako je prikazano na slici 9. Stupanj ubrzanja ovisi o obliku brda, koji se može iskoristiti u korist pretvorbe energije, ako je nagib između  $6^\circ$  i  $16^\circ$ . Kutevi veći od  $27^\circ$  i manji od  $3^\circ$  nisu poželjni.[2]

Još jedan važan faktor je orijentacija sljemena brda. Efekt ubrzanja je visok kada je prevladavajući vjetar okomit, a nizak kada se vjetar kreće paralelno u odnosu na nagib brda. Također ako se sljeme brda pruža u konkavnom obliku, tada je efekt ubrzanja poželjniji. Brda kojima se sljeme pruža u obliku trokuta za kojim slijedi glatka i obla geometrija pružaju veće ubrzanje. Brda kojima je vrh ravan mogu prouzrokovati turbulencije, pogotovo u nižim predjelima, koje nisu poželjne.[2]

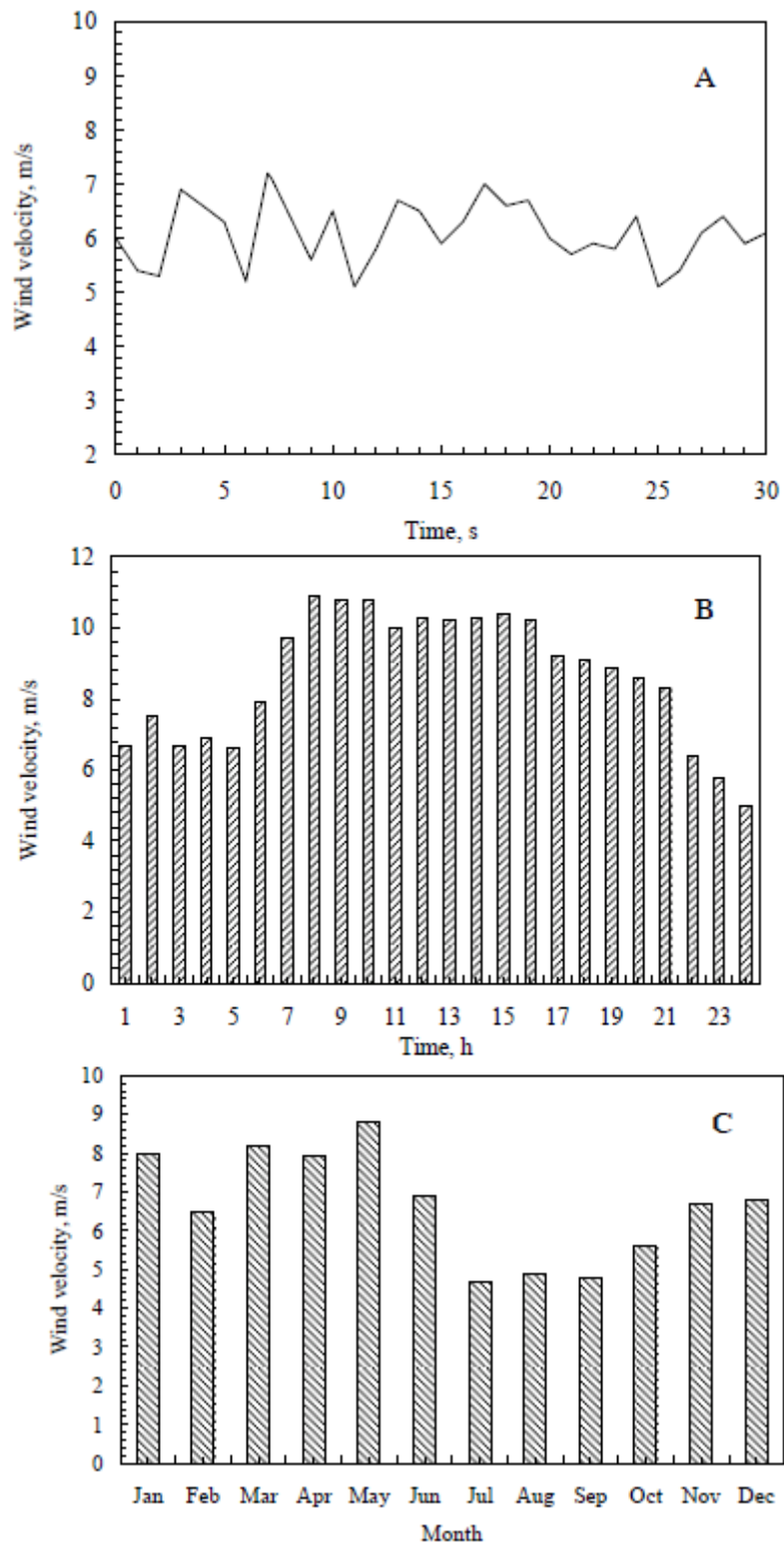


Slika 9 Efekt ubrzanja vjetra preko brda

Planinski prijevoji su još jedna zemljopisna značajka koja uzrokuje ubrzanje vjetra. Kada vjetar prolazi kroz usjeke planinskih barijera, zbog Venturijevog efekta, brzina vjetra se povećava. Geometrička konfiguracija (širina, dužina, nagib itd.) samog prijevoja je glavna karakteristika koja određuje stupanj ubrzanja. Prijevoj između dva brda, orijentiran paralelno smjeru vjetra, bio bi poželjna lokacija za montažu vjetroturbina.[2]

### 3.6. Vremenska promjena

Brzina i smjer vjetra se neprestano mijenjaju sa vremenom. U skladu sa tim promjenama, mijenjaju se također i dostupna snaga i energija sadržana u vjetru. Ovakve promjene mogu biti kratkoročne fluktuacije, dan-noć fluktuacije ili sezonske



Slika 10 Variranje brzine vjetra u ovisnosti sa vremenom

promjene. Primjer za kratkoročnu fluktuaciju brzine vjetra je prikazan na slici 10.(A), gdje je brzina promatrana u vremenskom intervalu od 30 sekundi. U ovom primjeru brzina se mijenja od  $5.1\text{ m/s}$  do  $7.2\text{ m/s}$  za promatrani vremenski interval. Ova kratkoročna promjena u brzini vjetra posljedica je lokalnog reljefa i meteoroloških

promjena. Može se primijetiti veće brzine vjetra kroz dan u odnosu na noćne sate. Ova pojava se još naziva dnevna varijacija, gdje je dan primjer na slici 9.(B). Glavni razlog promjene brzine vjetra u ovom slučaju je razlika u temperaturi mora i kopna. Potrebno je zamijetiti da dnevna promjena može biti povoljna za iskorištavanje energije vjetra budući da je potreba za snagom veća kroz dnevne sate.[2]

Brzina vjetra na lokaciji može se također mijenjati zbog sezonske promjene kao što je prikazano na Slici 9.(C). Glavni uzrok za sezonsku promjenu je variranje sunčevog zračenja kroz godinu, što je posljedica Zemljinog nagiba i eliptične putanje oko Sunca. Ova posljedica više istaknuta oko polova Zemlje. Spoznaja o varijaciji vremena i brzine vjetra na određenoj lokaciji je od esencijalne važnosti kako bi se osigurala dostupnost snage vjetra potrebnoj snazi. [2]

#### **4. MJERENJA VJETRA**

Precizni podaci karakteristika vjetra na određenim lokacijama je od visoke važnosti za uspješno planiranje i implementaciju projekata za iskorištavanje vjetra. Bitni podaci koji su potrebni za jednu takvu analizu je brzina i smjer prevladavajućeg vjetra u različitim vremenskim intervalima. Pri odabiru potencijalne lokacije za montažu vjetroagregata, često pomažu ekološki faktori. Podaci o vjetru izmjerene na obližnjoj meteorološkoj stanici mogu od prilike dati okvirnu sliku spektra vjetra koji je dostupan na određenoj lokaciji.[2]

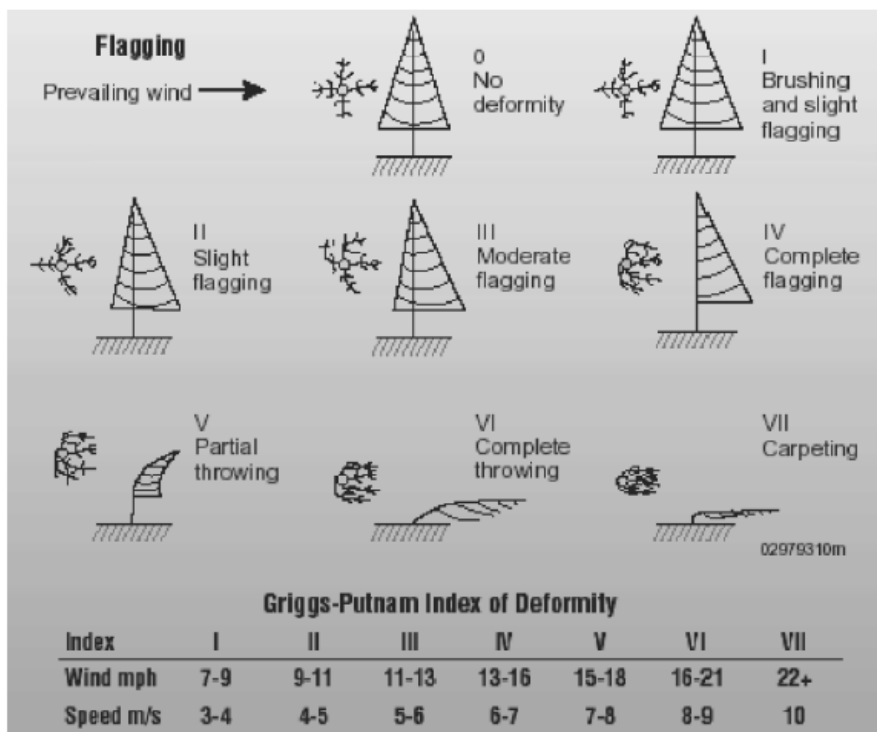
Osnovni preduvjet za analizu opravdanosti projekta vjetroagregata je pouzdano poznavanje resursa energije vjetra na potencijalnoj lokaciji vjetroturbine. Da bi se izvršila analiza resursa energije vjetra neophodno je izvršiti mjerenja utjecajnih parametara sa odgovarajućom mjernom opremom.[3]

Mjerenja ponekad nisu potrebna za preliminarnu procjenu povoljne lokacije montaže vjetroagregata. Na primjer, drveće koje raste pod određenim kutom može biti pouzdana indikacija dostupnih resursa. Ova pojava se naziva klonulost (*eng. flagging*) koja je prikazana na slici 11. Griggs-Putnam Indeks deformacije je razvijen kao alat za procjenu lokalne brzine vjetra s obzirom na deformaciju drveća ili klonulost koja je prikazana na slici 12.[11]





Slika 11 Klonulost drveća kao vizualni indikator brzine vjetra



Slika 12 Griggs- Putnamov index deformacije

#### 4.1. Mjerna oprema

Mjerenje brzine vjetra mogu se vršiti kalibriranom mjernom opremom visoke klase točnosti jer i mala greška u mjerenju brzine vjetra, s obzirom na kubnu ovisnost snage

vjetra o brzini stvara veliku grešku u mjerenju snage vjetra, a time i u procjenu godišnje proizvodnje električne energije vjetroagregata. Uz brzinu vjetra, potrebno je mjeriti smjer vjetra, temperaturu zraka i atmosferski tlak.[3]

Za mjerenje brzine vjetra koriste se različite vrste anemometara. Mjerenje brzine vjetra za namjenu u vjetroprojektima najčešće se koriste sljedeći tipovi anemometara:[3]

- anemometri sa šalicama (*cup anemometer*)
- anemometri sa propelerom
- ultrazvučni anemometri
- laser doppler anemometri

#### Anemometri sa šalicama (cup anemometer)

Cup anemometri su standardni anemometri koji se koriste za mjerenje brzine vjetra u projektima istraživanja potencijala energije vjetra. Sastoje se od vertikalne osovine na koju su pričvršćene 3 (ili rjeđe 4) šalice u obliku izdubljenih polukugla ili konusa, koji je prikazan na slici 13. Ovakav tip anemometra radi na principu razlike sila pritiska vjetra na zatvorenu i otvorenu polukuglu, što uzrokuje okretanje osovine anemometra. Ova vrsta anemometra je dosta inertna, tako da daje manje pouzdane rezultate u pogledu mjerenja udara vjetra. [3]



Slika 13. Cup anemometar postavljen na nosaču

### Anemometri sa propelerom

Ova vrsta anemometara ima propeler sa najčešće 4 lopatice, slika 14. Mjerenja ovise o smjeru strujanja vjetra. Nedostatak je da ovaj anemometar ne može mjeriti brzinu vjetra koji struji upravno na osovinu. Ovaj tip najčešće se montira tako da je osovina vertikalno postavljena i tada služi za mjerenje vertikalne komponente brzine vjetra.[3]



Slika 14 Propelerni anemometar za mjerenje vertikalne komponente brzine vjetra

### Ultrazvučni(Sonic) anemometar

Ova vrsta anemometra mjeri brzinu vjetra na osnovu promjena brzine prostiranja zvukova u atmosferi i uvjetima vjetra. Sastoji se od tri šiljka na čijim se vrhovima nalaze emiteri/receptori zvučnog signala, kao što se može vidjeti iz slike 15. [3]



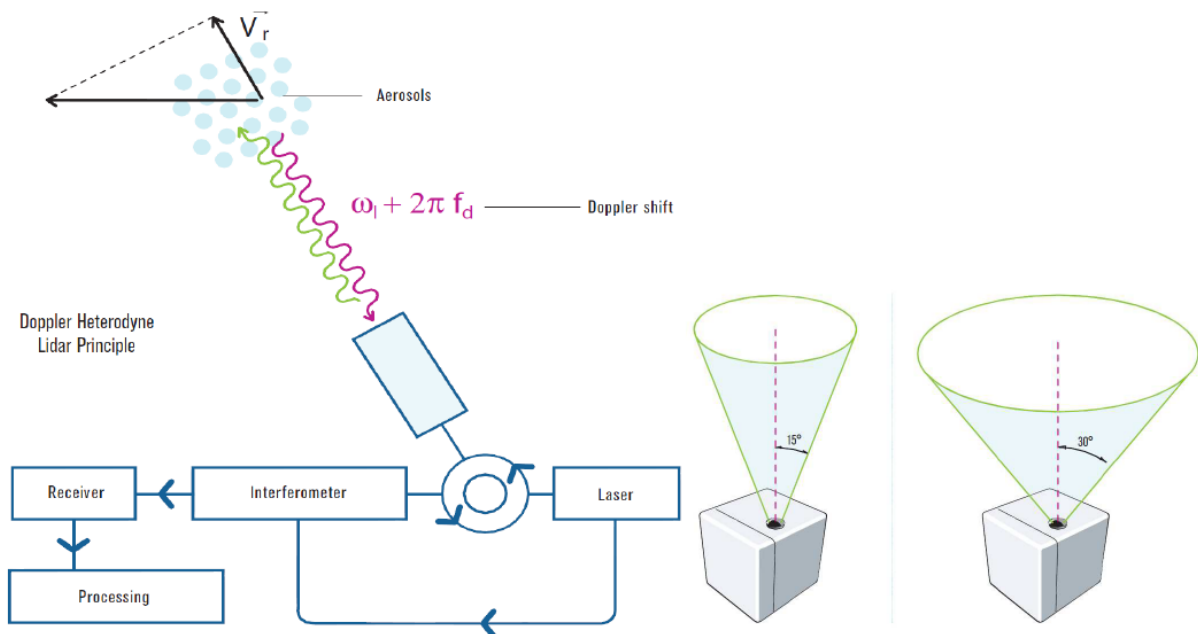
Slika 15 Ultrazvučni anemometar

S obzirom da su zvučni valovi mehanički valovi, brzina širenja zvučnih valova kroz atmosferu ovisi o brzini kretanja zraka. Što znači da se mjerenjem brzine širenja zvučnih valova između vrhova šiljaka može dobiti brzina vjetra. S obzirom da postoje tri šiljaka, moguće je odrediti i smjer vjetra.[3]

### Laser-doppler anemometri

Ovi sofisticirani sistemi za mjerenje brzine vjetra se prodaju pod komercijalnim nazivom LIDAR. Princip rada ovog sustava je prikazan na slici 16. U principu uređaj se sastoji od lasera koji emitira svjetlosnu zraku, određene valne dužine  $\lambda$ , od kojeg se jedan dio odbija od čestica u zraku. Ako se čestice ne kreću, tada odbijena zraka i upadna zraka imaju istu frekvenciju. Ukoliko postoji kretanje čestica, tada se frekvencija reflektirane zrake i upadne razlikuju, pri čemu mjereni frekvencijski odmak  $f_d$  je razmjernan relativnoj brzini čestica, odnosno brzini vjetra.[3]

$$V = \frac{\lambda f_d}{2} \quad (4.1.1.)$$



Slika 16 Shematski prikaz principa rada laser-doppler (LIDAR) sustava

### Pokazivači smjera

Za mjerenje sustava vjetra koriste se instrumenti koji registriraju ugao smjera vjetra u odnosu na geografski sjever koji se uzima kao referentni. Ovi instrumenti obično rade na principu varijabilnog otpora sa kliznim kontaktom koje je vezan za pokretni dio. Na pokretnom djelu se nalazi peraja koja usmjerava pomični dio instrumenta prema smjeru strujanja vjetra. Prikaz jednog takvog instrumenta nalazi se na slici 17.[3]



Slika 17. Pokazivač smjera vjetra

## **4.2. Statistički pokazatelji resursa energije vjetra**

Osnovni preduvjet za analizu ekonomske opravdanosti razvoja projekta vjetroelektrana je pouzdano poznavanje resursa energije vjetra na lokaciji potencijalne vjetroelektrane. Da bi se analizirali resursi energije vjetra neophodno je mjerenje utjecajnih parametara sa namijenjenom mjernom opremom visoke klase točnosti jer i mala greška pri mjerenju brzine vjetra, donosi veliku grešku u mjerenju snage vjetra zbog kubne ovisnosti snage o brzini vjetra.[3]

Period mjerenja brzine vjetra na nekoj lokaciji je minimalno jedna godina, kako bi se obuhvatile sezonske varijacije klimatologije na ciljnoj lokaciji. U vjetroenergetici je usvojen period mjerenja od deset minuta, tako da godišnji zbir podataka sadrži 52 560 vremenskih zapisa. Broj podataka u jednom zapisu ovisi o broju senzora koji su montirani na mjernom stupu. Za svaki senzor (anemometar, pokazivač smjera vjetra, termometar,...) u svakom desetominutnom intervalu standardno se zapisuju 4

podatka i to su: [3]

- srednja desetominutna vrijednost mjerene veličine,
- maksimalna srednja dvosekundna vrijednost,
- minimalna srednja dvosekundna vrijednost,
- standardna devijacija mjerene veličine.

Nakon završetka perioda mjerenja potrebno je mjerne podatke filtrirati, odnosno evidentirati i izbaciti podatke koji nisu validni (npr. zbog zaleđivanja opreme)

Statističkom analizom mjerenih podataka mogu se dobiti pokazatelji resursa energije vjetra na mjernom mjestu i mjernoj visini. Osnovni statistički pokazatelji su:

- srednja godišnja brzina vjetra,
- ruža vjetrova,
- histogram brzina vjetra,
- funkcija gustoće raspodjele vjerojatnosti učestalosti javljanja vjetrova.

#### 4.2.1 Srednja godišnja brzina vjetra

Jedan od najvažnijih podataka spektra vjetra dostupnog na lokaciji je prosječna vrijednost. Pojednostavljeno, prosječna brzina vjetra ( $\bar{V}$ ) je dana izrazom:[2]

$$\bar{V} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N V_i \quad (4.2.1)$$

Gdje je  $V$  brzina vjetra a  $N$  broj mjerenja.[2]

Srednja gustoća snage vjetra ( $\bar{P}$ ) na analiziranom mjerenom intervalu (jedna godina) je definirana sljedećom relacijom: [3]

$$\bar{P} = \frac{1}{2} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \rho_i V_i^3 \quad (4.2.2)$$

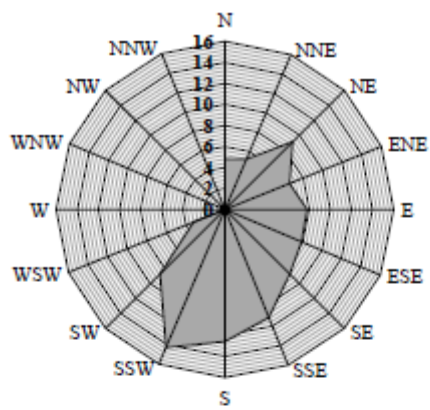
U prethodnoj relaciji uvažena je činjenica da se gustoća zraka  $\rho$  mijenja u toku vremena zbog promjene tlaka i temperature zraka. Proračun gustoće zraka u svakom desetominutnom intervalu  $i$  se može vršiti na osnovu mjernih podataka o pritisku i temperaturi zraka prema danoj relaciji.[3]

#### 4.2.2. Ruža vjetrova

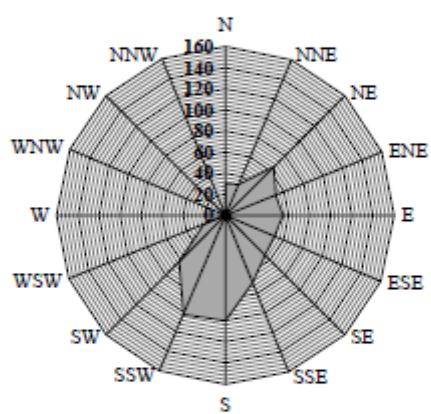
Ruža vjetrova predstavlja jednu vrstu polarnog dijagrama kojoj me opisuje učestalost pojave vjetra iz određenog smjera. Cijeli horizont ( $360^\circ$ ) se obično dijeli na 12 sektora gdje pojedinom sektoru pripada segment od  $30^\circ$ . Referentna os, u odnosu na koju se mjeri smjer vjetra je po konvenciji geografski sjever. Referentna os predstavlja os simetrije prvog sektora, odnosno prvi sektor obuhvaća kut od  $345^\circ$  do  $15^\circ$ , drugi od  $15^\circ$  do  $45^\circ$  itd. Na osnovu mjerenih podataka o smjeru vjetra, za svaki sektor se proračunava učestalost pojavljivanja vjetra čiji smjer pripada tom sektoru u postocima, gdje su postoci definirani u odnosu na promatrani vremenski period na koji se odnose mjereni podaci. [3]

U vjetroenergetici informacija o učestalosti pojavljivanja vjetra iz određenog smjera nije dovoljna. Potrebna je i informacija o prosječnoj brzini i snazi vjetra iz određenog smjera, pa se svakom sektoru grafički ili tabelarno dodjeljuju podaci o srednjoj brzini vjetra iz određenog smjera i srednjoj gustoći snage vjetra u tom sektoru. Na slici 18. je prikaz ruže vjetrova za tri različite vrste mjerenja. [3]

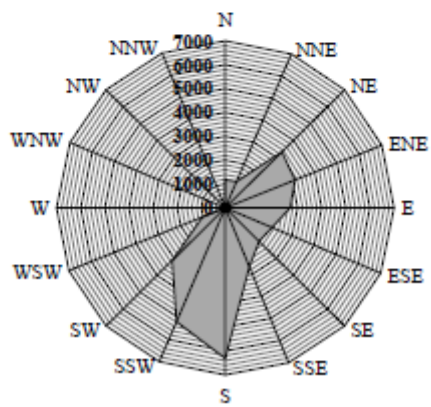
Podaci mjereni duže vrijeme na meteorološkim stanicama koje se nalaze blizu željene lokacije smještanja turbine mogu se koristiti za preliminarnu procjenu. Takvi podaci, koji su valjani za duže vrijeme mjerenja, bi trebali biti pažljivo ekstrapolirani kako bi prikazali stvarni profil vjetra na potencijalnoj lokaciji. Nakon preliminarnog istraživanja, mjerenja na lokaciji se općenito izvode za kraće vrijeme. Vrijeme mjerenja vjetra na lokaciji od jedne godine je dostatno za pretpostavke dugoročnih varijacija profila vjetra s preciznošću od 10 posto. [2]



A



B



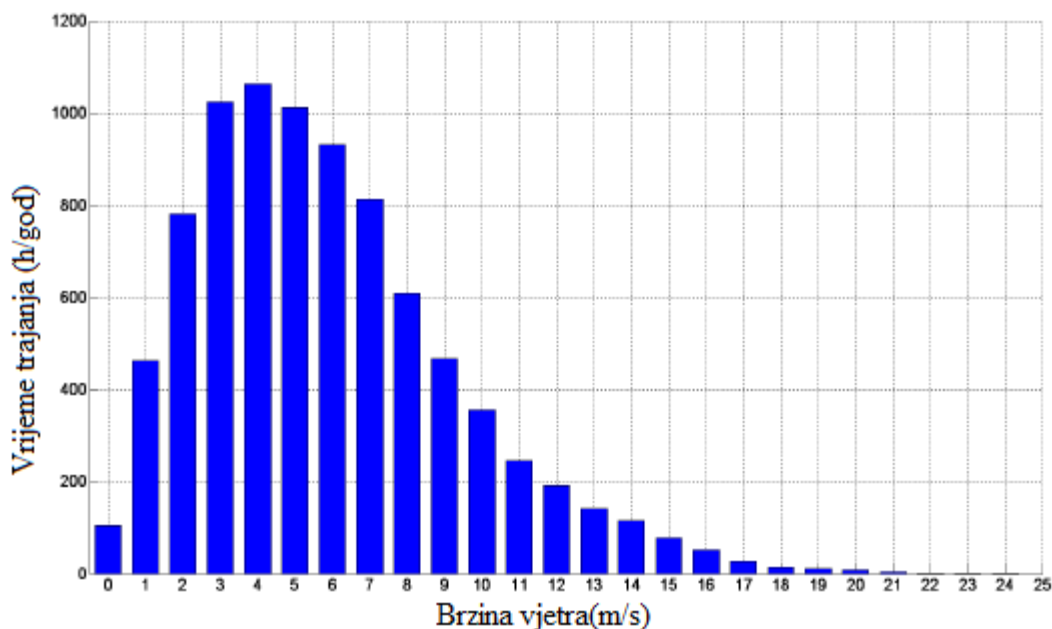
C

Slika 18 Grafički prikaz ruže vjetrova, A- ruža frekvencija, B- ruža brzina vjetra, C- ruža snage



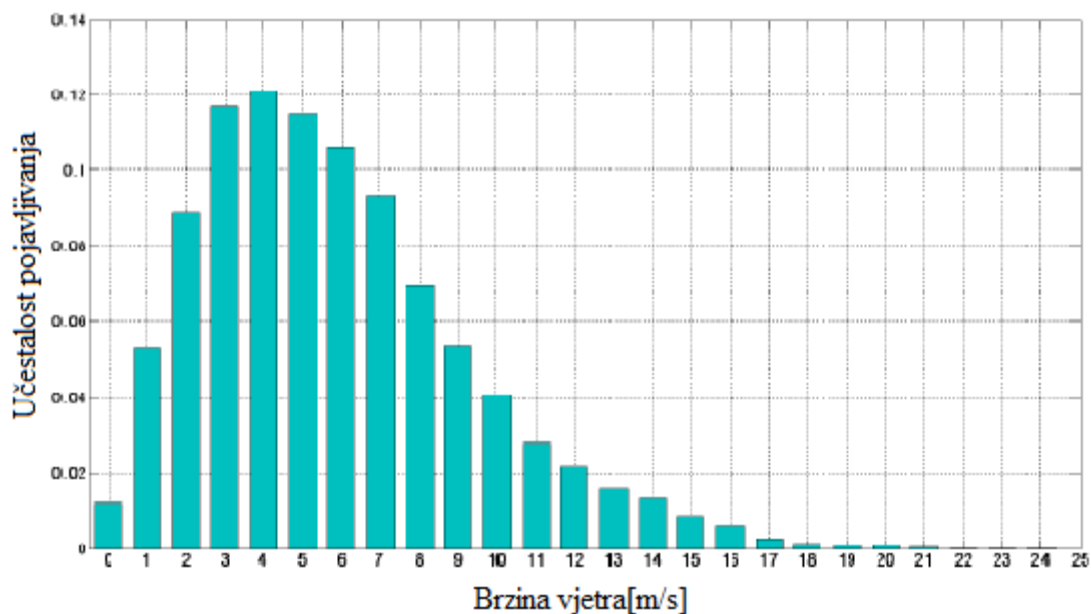
### 4.3. Diskretni histogram brzina vjetra

Informacija o srednjoj godišnjoj brzini vjetra nije dovoljna za procjenu moguće proizvodnje električne energije nekog vjetroagregata. Potrebno je poznavati koliko vremena vjetar puše određenim intenzitetom. Tu informaciju daje histogram brzina vjetra. Da bi se formirao diskretni histogram brzina vjetra, potrebno je iz vektora desetominutnih mjerenih podataka za određeni anemometar izdvojiti desetominutne intervale u kojima je vjetar puhao između  $V_j - 0.5 \text{ m/s}$  i  $V_j + 0.5 \text{ m/s}$  gdje su  $V_j = (0, 1, 2, \dots, V_{max})$  cjelobrojne vrijednosti brzina vjetra. Sumiranjem desetominutnih intervala dobija se ukupno vrijeme trajanja vjetra brzine  $V_j - 0.5 \text{ m/s} \div V_j + 0.5 \text{ m/s}$ . Vjetrovi čija je brzina  $V \leq 0.5 \text{ m/s}$  se tretiraju kao da nema strujanja vjetra. Na slici 16. prikazan je primjer diskretnog histograma brzine vjetra, dobiven na osnovu dvogodišnjih mjerenja brzine vjetra na visini od 60m.[3]



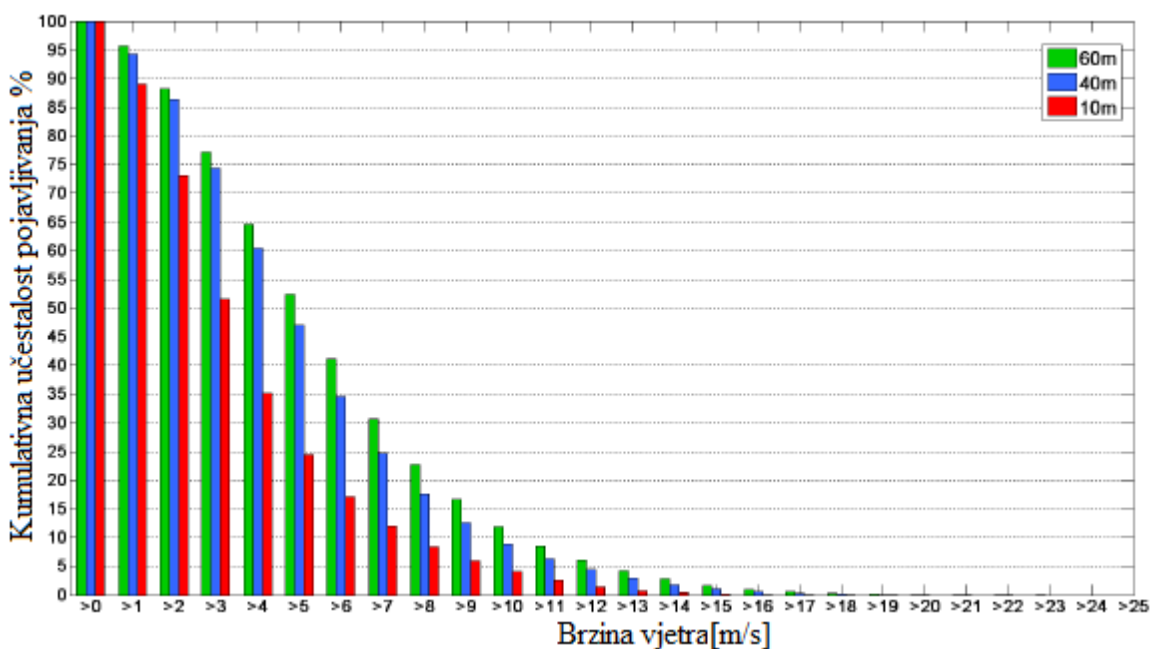
Slika 19. Diskretni histogram brzina vjetra

Ako se vrijednosti na ordinati podijele sa 8760 (ako se histogram odnosi na godišnji period) dobija se normalizirani histogram brzina vjetra, koji je prikazan na slici 20. [3] Na ordinati normaliziranog dijagrama se nalaze relativne vrijednosti učestalosti pojave vjetra određene brzine. Na primjer, na analiziranoj lokaciji shodno dijagramu na slici 16. najčešće puše vjetar brzine oko  $5 \text{ m/s}$ , odnosno 12% vremena (oko  $1000 \text{ h/god}$ ) puhao je vjetar u intervalu  $(5 \pm 0,5) \text{ m/s}$ . Ukupno vrijeme trajanja odsutnosti vjetra ( $V \leq 5 \text{ m/s}$ ) je 1,2%, odnosno oko  $100 \text{ h/god}$ .



Slika 20 Normalizirani diskretni histogram brzina vjetra

Jedan od načina za statističko predstavljanje je uređeni dijagram kumulativnog trajanja brzine vjetra. Na slici 18. prikazan je uređeni dijagram kumulativnog trajanja brzina vjetra dobiven na osnovu dvogodišnjih mjerenja brzina vjetra na različitim visinama iznad tla.[3]



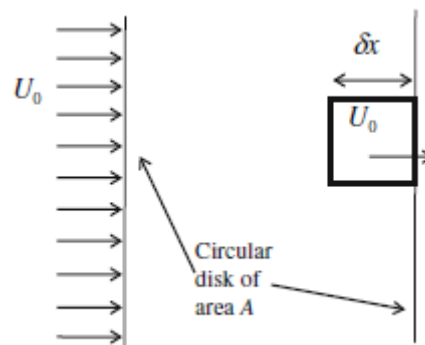
Slika 21. Uređeni godišnji dijagram kumulativnog trajanja brzina vjetra na različitim visinama

## 5. OSNOVE PRETVORBE ENERGIJE VJETRA

Energija dostupna u vjetru je zapravo kinetička energija velike mase zraka koji struji preko zemljine površine. Lopatice vjetroturbine primaju kinetičku energiju vjetra, koja se zatim pretvara u mehanički ili električni oblik, ovisno o potrebi. Učinkovitost pretvorbe vjetra u druge oblike energije uvelike ovisi o učinkovitosti međusobnog djelovanja rotora i struje zraka.[2]

### 5.1. Snaga vjetra

Na slici 22. turbina je zastupljena sa okruglim diskom čija površina iznosi  $A = \pi R^2$  gdje  $R$  označava polumjer rotora u metrima. Analiza koja slijedi određuje kinetičku energiju u zraku koji prolazi disk rotora u jedinici vremena, gdje se pojam „rotor“ odnosi na lopatice kao komplet. Analiza se provodi u odsutnosti lopatica, zbog razloga koji će se objasniti uskoro. Jedinica snage je u džul, J, stoga će energija koja prolazi biti u J/s, što daje vate, jedinicu snage. Inače čovjeka koji proračunava vjetroturbinu i krajnjeg korisnika najčešće zanima izlazna snaga. Međutim, zapravo je električna energija u obliku kilovat-sati, kWh, koja se mjeri i plaća od strane elektroprivrede koja je povezana na turbinu. [12]



Slika 22 Elementarni volumen koji prolazi disk rotora

Desna strana slike 22. prikazuje elementarni dio volumena strujanja zraka. Njegov točan oblik nije potrebno točno odrediti za potrebe proračuna. Dio volumena je pred prijelazom imaginarnе linije koja predstavlja disk rotora. Volumen elementa je umnožak svoje površine,  $\Delta A$ , i dužine okomite na disk,  $\delta x$ , stoga masa tog elementa iznosi  $\Delta \rho \Delta A \delta x$  i njegova kinetička energija iznosi  $\frac{1}{2} \rho \Delta A U_0 \delta x U_0^2$ . Vrijeme potrebno za element da prijeđe disk,  $\delta_t$ , je dan sa  $\delta_x = U_0 \delta_t$ . Dodatak ukupnom iznosu kinetičke energije koja prolazi u vremenu  $\delta_t$  se označava kao  $\Delta KE$ , i dan je izrazom

$$\delta(\Delta KE) = \frac{1}{2} \rho \Delta A U_0 \delta_x U_0^2 \quad (5.1.1)$$

Zbrajanje svih elemenata površine koji čine disk daje kinetičku energiju koja prolazi kroz disk kao

$$\delta(KE) = \frac{1}{2} \rho A U_0^3 \delta_t \quad (5.1.2)$$

Jednadžba se sada može formalno uputiti prema limesu gdje  $\delta_t \rightarrow 0$ , što daje

$$P = d(KE)/dt = \frac{1}{2} \rho A U_0^3 \quad (5.1.3)$$

Gdje je P snaga, stopa vremenske promjene (derivacija) energije. Jednadžba (5.1.3) je posebno zanimljiva jer sugerira, kao što i doista jest slučaj, da izlazna snaga svake turbine ovisi o kubu brzine vjetra, što je temeljna činjenica vjetroenergetike. Razlog ovisnosti izlazne snage o kubu brzine vjetra je da sama brzina vjetra određuje i količinu energije, proporcionalnu sa  $U_0^2$ , i količinu zraka koja prolazi rotor u jedinici vremena, što je proporcionalno  $U_0$ . U praksi izlazna snaga ne dostiže teoretsku snagu iz relacije (5.1.3) jer iskorištavanje kompletne kinetičke energije iz vjetra bi podrazumijevalo da se brzina vjetra uspori do  $0 \text{ m/s}$ . Nadalje, vjetroturbina ne može „uhvatiti“ kompletno strujanje zraka koje inače prolazi kroz disk, čak i ako bi se uspjelo usporiti strujanje do nule, tim rečeno proračun kinetičke energije u odsutnosti lopatica precjenjuje stvarnu iskorištenu energiju. Uključujući konačnu učinkovitost prijenosnog sklopa i generatora, i aerodinamičke gubitke zbog viskoznosti fluida, razumno je pretpostaviti da će snaga pretvorena u električnu energiju biti 60% manja od rezultata dobivenog iz jednadžbe (5.1.3).

## 5.2. Parametri rada turbine

Teoretska snaga dostupna u strujanju vjetra dana je relacijom (5.1.3). Međutim, turbina nije u mogućnosti iskoristiti svu snagu sadržanu u vjetru. Stvarna snaga iskorištena od strane rotora bit će određena učinkovitošću kojom energija prelazi sa vjetra na rotor vjetroturbine. Takva se učinkovitost najčešće određuje koeficijentom snage ( $C_p$ ). Stoga, koeficijent snage rotora može se definirati kao omjer stvarne snage stvorene

od strane rotora i teoretske snage dostupne u vjetru, što daje[2]

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho U_0^3 \pi R^2} \quad (5.2.1.)$$

Potrebno je zamijetiti da:

- $C_p$  nema mjernu jedinicu
- Prema konvenciji, uključuje faktor  $1/2$  kako bi povezao snagu sa protokom kinetičke energije kroz rotor kao što je određeno u prošlom podpoglavlju.
- Za kasniju upotrebu, potrebno je znati da  $C_p$  nije strogo učinkovitost, iako je često tretirana kao jedna. Moguće je povećati  $C_p$  povećavanjem brzine vjetra kroz rotor, npr. zaokruživanjem rotora difuzorom. Stoga,  $C_p$  se može interpretirati kao učinkovitost kada se uspoređuje turbine iste vrste, kao što su turbine bez difuzora razmatrane u ovom radu [12]

Relacija (5.1.3) pomaže u dimenzionalnoj analizi, tvrdnjom da bi snaga vjetroturbine trebala ovisiti o brzini vjetra, gustoći zraka, radijusu rotora,  $\Omega$ , i kinematskoj viskoznosti zraka,  $\nu$ , tada:

$$f(P, U_0, \rho, R, \Omega, \nu) = 0 \quad (5.2.2.)$$

Gdje  $f$  označava (još nepoznatu) funkcionalnu ovisnost,  $\nu$  označava viskoznost podijeljenu s gustoćom, a izražava se u jedinicama  $m^2/s$ . Za nivo mora  $\nu = 1.5 \times 10^{-5} m^2/s$  na sobnoj temperaturi od  $20^\circ C$ . [12]

Jednadžba (5.2.2.) sadrži šest parametara ili varijabli i tri jedinice, stoga trebali bi postojati tri nedimenzionalne grupe koje se dobiju iz dimenzionalne analize. Kako bi se osiguralo da je  $C_p$ , definiran relacijom (5.2.1.), pripada ovim grupama, „ponavljajuće varijable“ trebaju biti  $U_0, \rho$  i  $R$ . Ove ponavljajuće varijable mogu, u principu, se pojaviti u svim nedimenzionalnim grupama. Tada formiranje ovih grupa može biti zapisano kao

$$f(C_p, \Omega R/U_0, U_0 R/\nu) = 0 \quad (5.2.3.)$$

Drugi član ove grupacije je dovoljno važan da bi imao svoje ime. Naziva se omjer vršne

brzine i označava se simbolom  $\lambda$ . Za buduću upotrebu

$$\lambda = \frac{\Omega R}{U_0} = V_{vrha}/U_0 \quad (5.2.4.)$$

je omjer obodne brzine vrhova lopatica,  $V_{vrha}$ , u odnosu na brzinu vjetra. Pri određivanju potiska generiranog na lopaticama  $\lambda$  je bitan jer postavlja napadni kut lopatica. Prosto rečeno, omjer vršne brzine utječe na aerodinamiku lopatica. Inače  $\lambda$  se nalazi u rasponu od 7 do 10 za turbinu koja radi na maksimalnom  $C_p$ . Prema tome vrhovi lopatica se kreću brzinom koja je višestruko veća od brzine vjetra, i tome može slijediti da se brzina vrhova lopatica približi granici nestlačivog strujanja, što iznosi oko 30% brzine zvuka. Brzina zvuka na morskoj razini iznosi 340 m/s.[12]

Treći član grupacije (5.2.3.) predstavlja Reynoldsov broj,  $Re$ , koji općenito mjeri važnost viskoznosti fluida. Forma Reynolds-ovog broja prikazana u (5.2.3.) se ne koristi u proračunima vjetroturbina. Kasnija razmatranja će pokazati da najkorisnija formula se dobiva uzimajući u obzir uzgon i otpor strujanja sekcija aerodinamičkog profila koji čine lopaticu vjetroturbine. Takav  $Re$  se izračunava koristeći dužinu osi sekcije,  $c$  - širinu lopatice, i „konačnu“ brzinu lopatice  $U_T$ , gdje vrijednosti oba parametra variraju duž lopatice. [12]

Zadnja potrebna varijabla je potisak na lopatice,  $T$ . Ova sila nije toliko važna za vjetroturbine kao što je za propelere, kojima je glavna funkcija da bi proizvedu potisak. Međutim, potisak je važan zbog toga što djeluje na toranj vjetroturbine, stoga mora biti uključen u proračun tornja i temelja vjetroturbine. Dimenzionalna analiza započinje od modificirane relacije (5.2.2.)

$$f(T, U_0, \rho, R, \Omega, \nu) = 0 \quad (5.2.5.)$$

Iz čega se dobiva relacija za koeficijent potiska

$$C_p = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho U_0^2 \pi R^2} \quad (5.2.6.)$$

U teoriji, maksimalni koeficijent snage rotora je dan Betz-ovim zakonom, koji nalaže

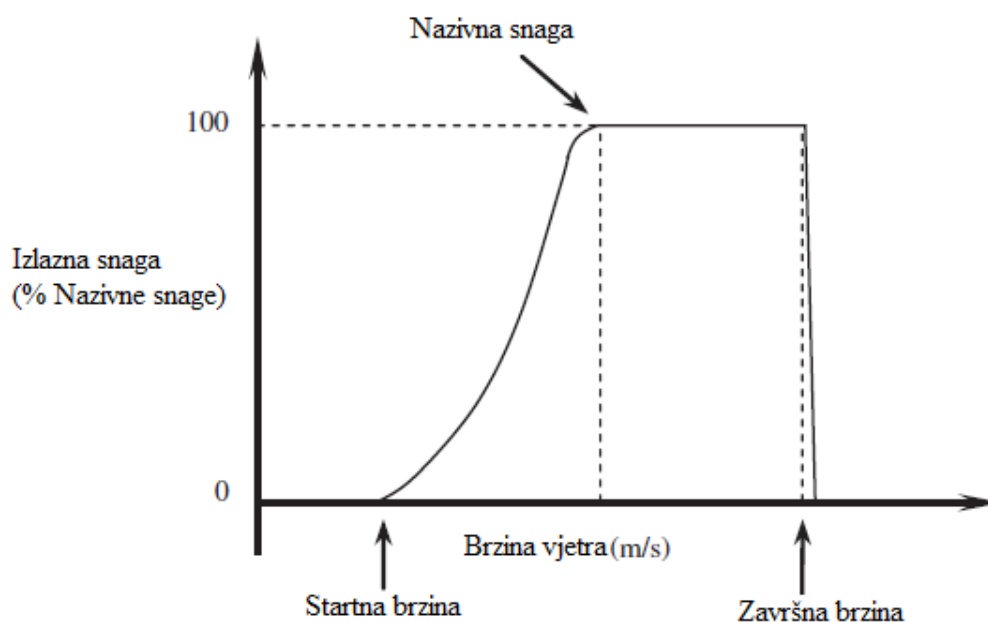
da je  $C_p = 16/27 = 0.593$ .

Međutim u praksi ostale neučinkovitosti također utječu na maksimalnu moguću izlaznu snagu kao što su: [10]

- Gubici pri prolazu vjetra kroz rotor
- Broj korištenih lopatica, i gubici na vrhovima lopatica
- Aerodinamični otpor
- Gubici u električnim uređajima, neefikasne pretvorbe gdje nastaje toplina ili neefikasnost četkica

### 5.3. Krivulja snage

Krivulja snage vjetroturbine prikazuje izlaznu snagu (ili stvarnu električnu izlaznu snagu ili postotak nazivne snage) turbine kao funkciju srednje brzine vjetra. Krivulje snage se najčešće određuju iz fizičkih mjerenje vjetra. Kao što je prikazano na slici 23. vjetroturbina počinje proizvoditi korisnu snagu pri niskoj brzini vjetra, definirana kao startna brzina (*cut-in speed*) tj. brzina pri kojoj se rotor vjetroturbine počinje okretati. Izlazna snage se kontinuirano povećava sa povećanjem brzine vjetra do točke zasićenosti, gdje izlazna snaga dostiže svoj maksimum, definirana kao nazivna izlazna snaga. Prema tome brzina u toj točki je definirana kao nazivna brzina. Povećanje brzine vjetra pri radu turbine na nazivnoj snazi neće povećati izlaznu snagu zbog aktivacije sustava za kontrolu snage. [9]



Slika 23 Graf krivulje vjetroturbine

Kada brzina vjetra postane kritično visoka, vjetroturbina se treba što prije zaustaviti kako bi se spriječio nastanak štete. Takva brzina je definirana kao završna snaga (cut-out speed). Stoga, startna i završna brzina definiraju granice rada vjetroturbine. [9]

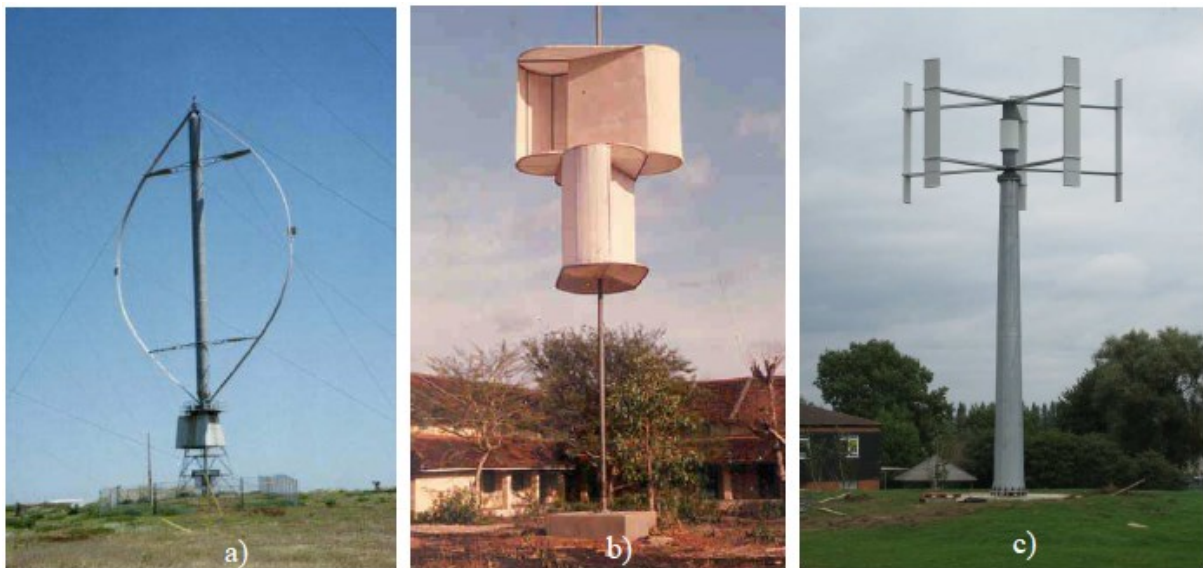
#### 5.4. Podjela vjetroelektrana

Kinetička energija vjetra se pretvara u mehaničku energiju kružnog kretanja pomoću vjetroturbine. Postoje različite vrste konstrukcija vjetroturbina. Cilj je da se postigne što veći stupanj iskorištenja i stabilan rad u što širem rasponu brzina vjetra. Osim što se vjetroturbine dijele s obzirom na položaj osovine, one se također mogu dijeliti s obzirom na mjesto postavljanja (na moru ili kopnu); i s obzirom na snagu (male - do 30 kW, srednje i velike – do 1500 kW i one na moru – više od 1500 kW) Generalno, vjetroturbine se dijele na vjetroturbine sa : [3]

- Vertikalnom osovinom,
- Horizontalnom osovinom.

##### 5.4.4. Vjetroturbine sa vertikalnom osovinom

Kod vjetroturbina sa vertikalnom osovinom vjetar struji normalno na os rotacije, pa se one ne moraju usmjeravati prema smjeru strujanja vjetra. Kod njih se generator i transformator postavljaju u podnožju turbine, te nisu potrebni jaki tornjevi. [3] Na slici 24. prikazani su različiti tipovi vjetroturbina sa vertikalnom osovinom.



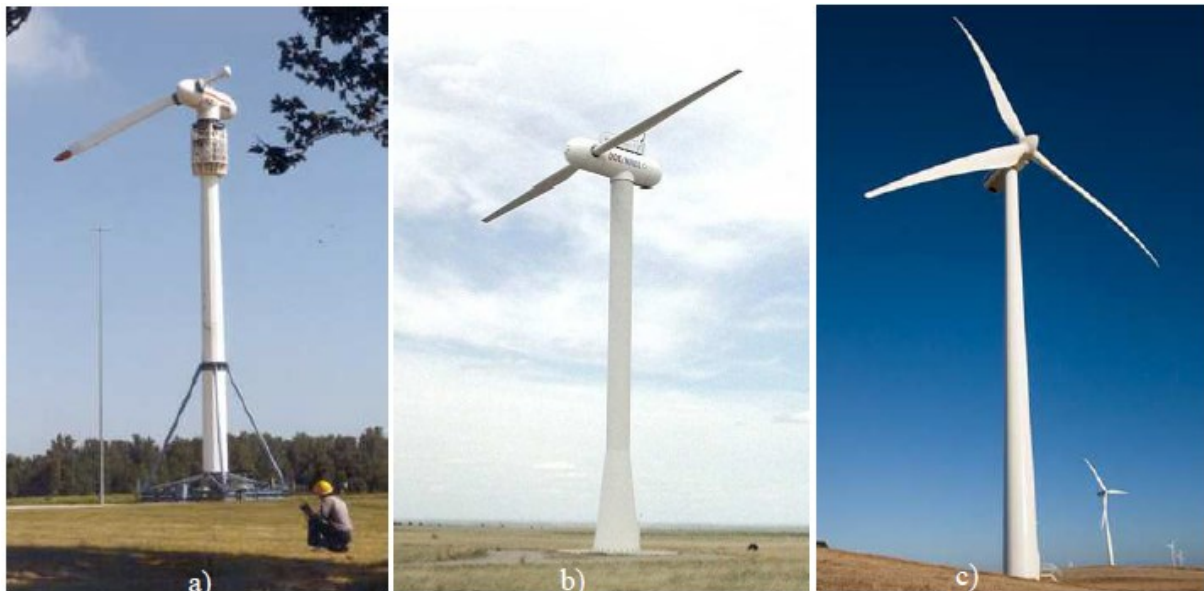
Slika 24. Različiti tipovi vjetroturbina sa vertikalnom osovinom a) Darriusova vjetroturbina; b) Savoniusova vjetroturbina; c) H vjetroturbina



#### 5.4.5. Vjetroturbine sa horizontalnom osovinom

Vjetroturbine sa horizontalnom osovinom se danas dominantno koriste, kako za velike, tako i za male snage. Vjetroturbine sa horizontalnom osovinom mogu biti postavljene uz i niz vjetar. Vjetroturbine postavljene niz vjetar se same prilagođavaju smjeru vjetra i ne zahtijevaju posebne mehaničke sustave (yaw control). Osim toga, pri jačem vjetru nema opasnosti od kontakta lopatica i stupa jer se lopatice savijaju od stupa. Nedostatak im je što lopatice pri rotaciji prolaze kroz zavjetrinu stupa, čime se stvaraju mehaničke vibracije i buka. Osim toga, stup stvara i turbulencije što smanjuje efikasnost vjetroturbine, pa se ovaj koncept danas rijetko koristi za veće snage. [13]

Moderne vjetroturbine velikih snaga se grade sa horizontalnom osovinom i vjetroturbinom postavljenom uz vjetar, pa moraju imati sistem za zakretanje osovine u horizontalnoj ravnini za praćenje promjene smjera vjetra (yaw control). Mogu imati različiti broj lopatica (slika 25.), ali se najčešće koriste vjetroturbine sa tri lopatice, jer daju najveći stupanj iskorištenja i najmanju oscilaciju mehaničkog momenta. [13]



Slika 25. Različiti tipovi vjetroturbina velikih snaga sa horizontalnom osovinom: a) vjetroturbine sa jednom lopaticom i utegom; b) vjetroturbina sa dvije lopatice; c) vjetroturbina sa tri lopatice

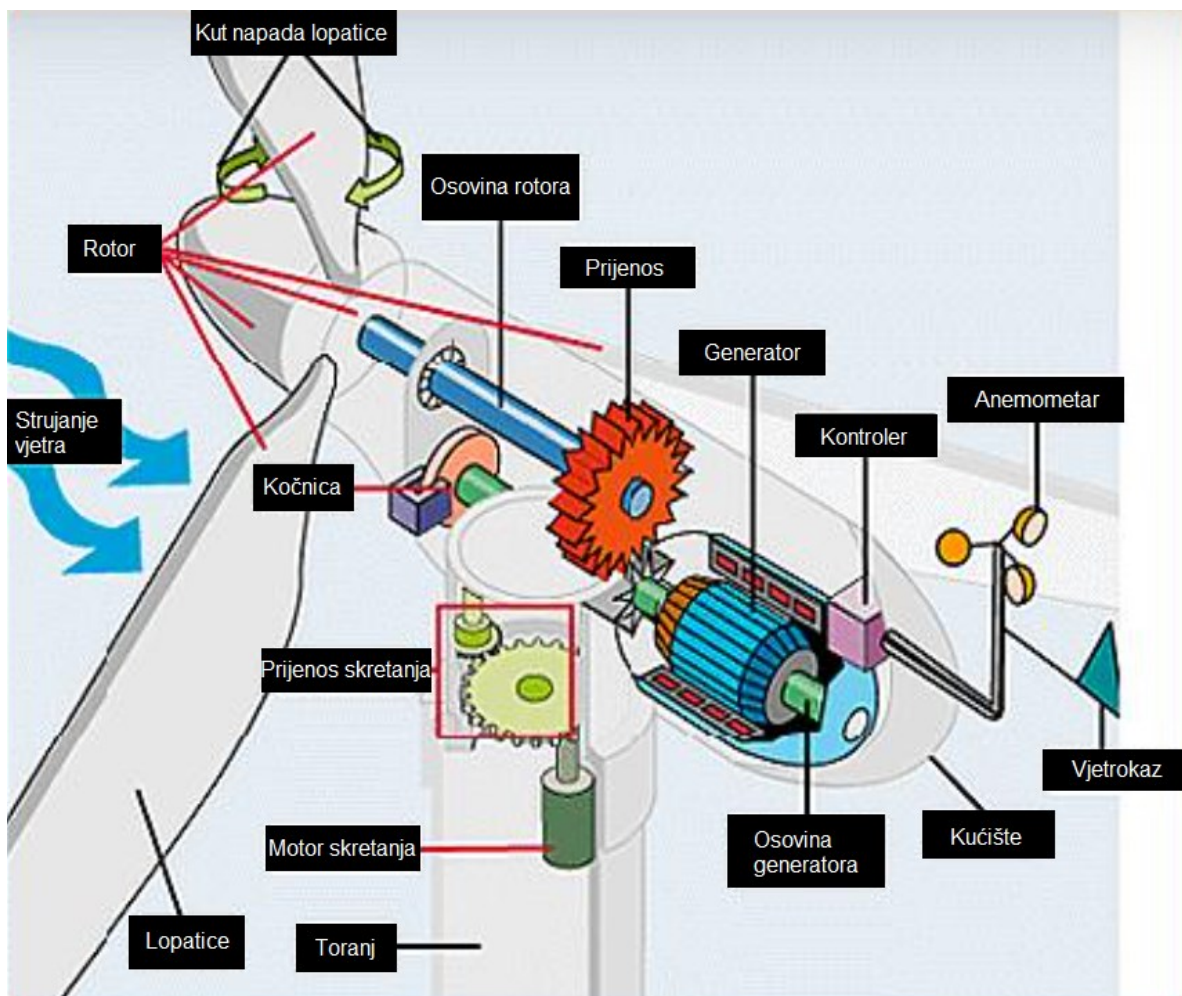
#### 5.5. Komponente vjetroatregata

Vjetroatregat se sastoji od stupa i konstrukcije koja je montirana na vrh samog stupa. Takvo kućište u sebi sadrži nekoliko komponenti, koje obavljaju određenu funkciju u

procesu pretvorbe energije vjetro u električnu energiju. Slika 26. prikazuje komponente vjetroagregata od kojih se ističu rotor vjetroagregata, prijenosni sustav (multiplikator), generator, sustav upravljanja, transformator, i spoj na mrežu. [11]

### Rotor vjetroagregata

Vjetar pogoni rotor vjetroagregata i pretvara ga u mehaničku energiju. Rotor je uglavnom sastavljen od glavčine i lopatica, gdje su lopatice pričvršćene na glavčinu mehaničkim zglobovima. Moderni vjetroagregati uglavnom sadrže dvije ili tri lopatice, napravljene iz kompozita staklenih vlakana i poliestera. [15] U starijim varijantama vjetroagregata lopatice su uglavnom čvrsto pričvršćene na glavčinu, dok kod modernijih vjetroagregata lopatice imaju mogućnost okretati se oko svoje uzdužne osi. [14]



Slika 26 Funkcionalni sklop modernog vjetroagregata

### Prijenosni sustav

Kao što je prikazano na slici 26 mehanička energija rotora se prenosi na generator kroz prijenosni sustav, koji se inače sastoji od osovine rotora, mehaničke kočnice, i prijenosa. Mehaničke kočnice se inače koriste kao rezervni sustav kočenja u slučaju da aerodinamički sustav kočenja zakaže ili kao parkirna kočnica jednom kada se vjetroturbina zaustavi. Sustav aerodinamičke kočnice radi na način da okreće rotor od vjetra, uglavnom devedeset stupnjeva od uzdužne osi lopatice. [14]

Glavna svrha prijenosnog sustava je da povećava izlaznu brzinu okretaja. Budući da se prijenos podvrgava visokim i varijabilnim momentima zbog trenda povećavanja snage vjetroturbine, veći dio prijenosa se nakon dvije godine rada kvari.[16] Kao posljedica kvarenja prijenosa, u moderne vjetroatagregate se on ne ugrađuje, već se sustav izvodi generatorima sa povećanim brojem polova. [14]

### Toranj

Tornjevi se mogu podijeliti u dvije kategorije i to su: tornjevi učvršćeni čeličnim užetom, i samonosivi tornjevi. Za srednje i velike vjetroatagregate koriste se pretežno samonosivi tornjevi – zašiljeni okrugli tornjevi. [23]



*Slika 27. Rešetkasti toranj*



*Slika 28. Čelični stup*

Za male vjetroagregate, samonosivi tornjevi se općenito svrstavaju u rešetkaste tornjeve (slika 27), čelične stupove (slika 28), i drvene stupove. Samonosivi tornjevi su općenito skuplji od tornjeva vezanih čeličnom užadi za danu visinu, što je i razlog zašto se za male vjetroagregate pretežno izabiru tornjevi vezani čeličnom užadi. [14] Više o tornjevima u nastavku.

## **6. AERODINAMIKA VJETROTURBINA**

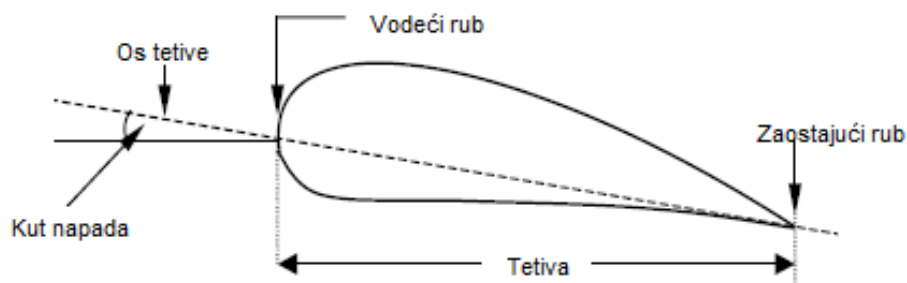
Aerodinamika se bavi strujanjem zraka i ostalih plinovitih fluida, te silama koje djeluju na tijela koja se gibaju kroz medije. Tijekom razvoja vjetroturbina, nekoliko napora je napravljeno kako interpretirati i razumjeti aerodinamičke principe pretvorbe energije vjetra i primijeniti ih u uspješnom sustavu eksploatacije. Teorije aerodinamike razvijene za zrakoplove i helikoptere su prihvaćene za definiranje i izvođenje vjetroturbina. Međutim, u novije vrijeme, teorije su specifično formulirane za vjetroturbine koje su daljnje ugladene i podupriete uz pomoć eksperimentalnih tehnika. [2]

### **6.1. Aero-profil**

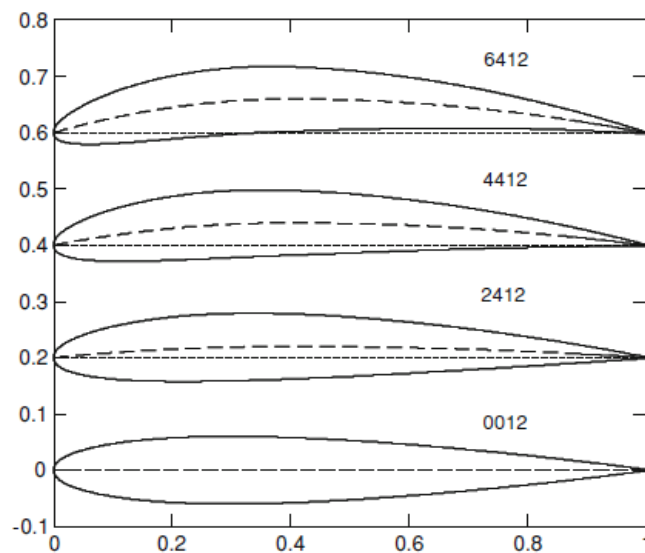
Za učinkovito iskorištavanje energije vjetra, lopatice modernih vjetroturbina su napravljene sa presjecima profila. Važne značajke takvih aero-profila su prikazane na slici 29. Aero-profil korišten za starije turbine bili su profili korišteni za svrhe avijacije pod odborom NACA-e(National Advisory Comittee for Aeronautics). [2]

Vodeći rub na aero-profilu je najispupčeniji rub koji je na lijevoj strani slike 30 strujanje vjetra je sa lijeve strane na desnu, a uzgon,  $l$ , djeluje prema gore. Praktično svi aero-profilu imaju oštar zaostajući rub koji je na desnoj strani presjeka. Ravna linija koja spaja vodeći i zaostajući rub naziva se os tetive,  $c$ . Kut napada,  $\alpha$ , je kut između slobodnog toka vjetra,  $U_0$ , i osi tetive.[12]

NACA specificira značajke aero-profila brojevima. Stoga, u četveroznamenkastoj specifikaciji, prvi broj označava maksimalni nagib aero-profila na središnjoj osi (u postotku osi), drugi broj daje lokaciju točke maksimuma nagiba od vodećeg ruba, te treća i četvrta znamenka označavaju maksimalnu debljinu. Peteroznamenkasta specifikacija aero-profila je slična četveroznamenkastoj, ali kao peta znamenka dana je informacija o karakteristici uzgona. U peteroznamenkastoj NACA specifikaciji proračunski koeficijent uzgona je dan sa 1.5 puta vrijednost na prvom mjestu. Polovina udaljenosti od vodećeg ruba do pozicije najvećeg nagiba je prikazan sa drugom i trećom znamenkom. Četvrta i peta znamenka označavaju debljinu aero-profila. [2]



Slika 29. Aeroprofil lopatice



Slika 30. Aeroprofilu označeni prema NACA standardu

## 6.2. Uzgon i sila otpora aero-profila

Aero-profil određenog oblika imati će uzgon,  $l$ , i silu otpora,  $d$ , ovisnu o  $U_0$  (koji z aero-profil je jednak efektivnoj brzini  $U_T$  za element lopatice),  $c$ ,  $\rho$ ,  $\nu$ , i kut napada  $\alpha$ . Što vodi do definicije koeficijenta uzgona i otpora kao: [12]

$$C_l = \frac{l}{\frac{1}{2}\rho U_0^2 c} \text{ i } C_d = \frac{d}{\frac{1}{2}\rho U_0^2 c} \quad (6.1.1.)$$

I osnovna formulacija:

$$C_l = C_l(\alpha, Re) \text{ i } C_d = C_d(\alpha, Re) \quad (6.1.2.)$$

Gdje je Reynoldsov broj,  $Re = U_0 c/\nu$ . Potrebno je zamijetiti da uzgon i otpor koji se javljaju u (6.1.1.) imaju jedinice izražene u Njutnima po metru ( $N/m$ ). Uzrok tome je što aero-profil je dvodimenzionalna veličina i ne bi imalo smisla tumačiti da uzgon i otpor ovise o dužini aero-profila.[12]

## 7. PRORAČUN MALOG VJETROAGREGATA

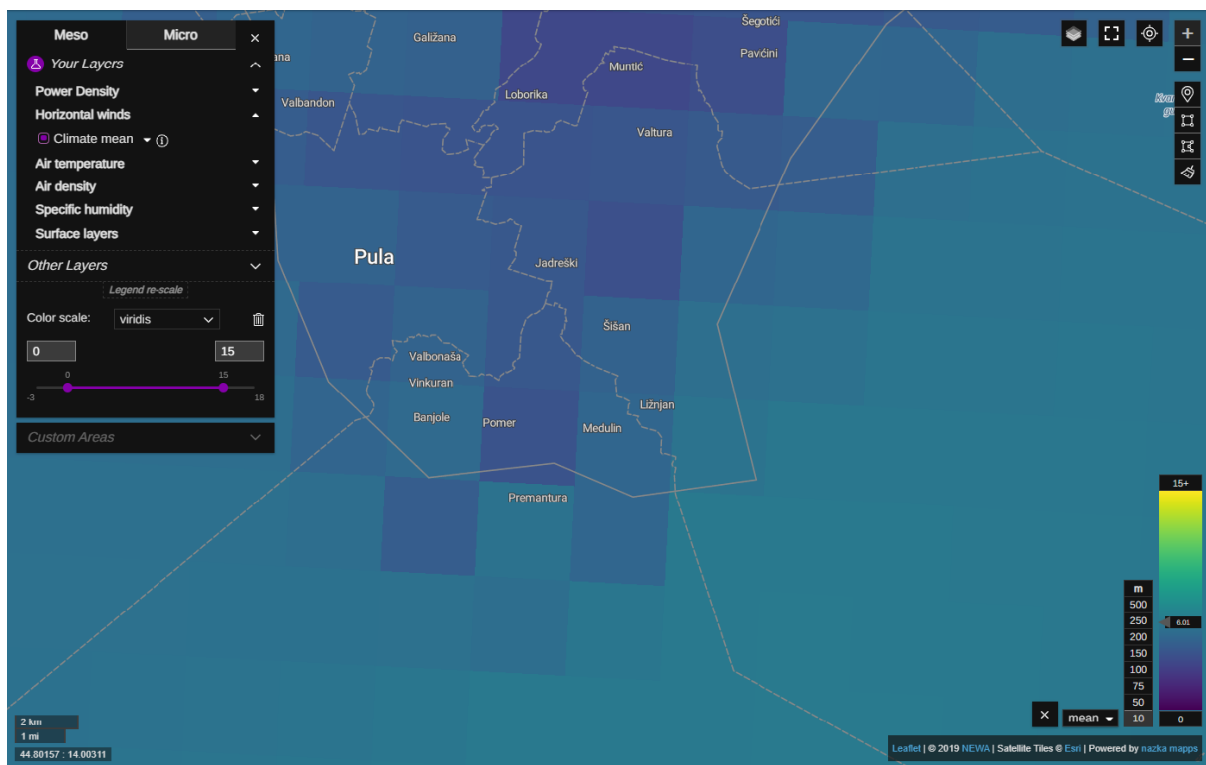
Cilj ovog poglavlja je definirati koncept vjetroagregata sa horizontalnom osi, zatim korištenjem inženjerskih metoda razviti legitiman i održiv završni projekt. Kako bi se postigao spomenuti cilj, osmisлити će se idejni projekt sa općenitim operativnim opisom koji će se zatim proračunski provjeriti.

Kada su uvjeti projekta postavljeni, odrađuje se glavni dio proračuna. Što primarno zahtijeva ispitivanje vjetra kao resursa, i odabir lokacije za montažu dizajniranog agregata. Sljedeći korak je razvijanje samog agregata, tj. proračun njegovih komponenata s obzirom na uvjete rada, i potrebnih karakteristika.

Kao to je u zadatku rada navedeno, potrebno je proračunati vjetroagregat koji će proizvoditi pola godišnje potrošnje električne energije jednog prosječnog kućanstva, odnosno 4000 kWh godišnje.

## 7.1. Lokacija

Kao odabrana lokacija vjetroagregata izabrano je područje rta Marlera, Ližnjan. Područje na rtu je odabrano zbog povoljnih brzina vjetra i udaljenosti od naseljenog mjesta. Gradić Ližnjan udaljen je od pozicije tri kilometara zračne udaljenosti, a brzina vjetra je među povoljnijim brzinama za pretvorbu energije vjetra u električnu energiju. Prema izvoru „Global Wind Atlas“ prosječna godišnja brzina vjetra na području rta Marlera na visini od deset metara iznosi  $6 \text{ m/s}$  [17,18], što odgovara podacima iz klimatskog atlasa hrvatske DHMZ-a i može se iščitati iz slike 31. Međutim, kako bi se dobili što precizniji podaci vjetra, ne samo brzina, već smjer vjetra i ostale karakteristike, potrebno je mjerenje samih karakteristika vjetra na lokaciji, anemometrom. Mjerenje karakteristika vjetra na lokaciji je precizan i mjerodavan način analize stanja i utvrđivanja isplativosti montaže vjetroagregata.



Slika 31 Brzina vjetra na 10 metara

## 7.2. Osnovni parametri vjetroagregata

Za određivanje osnovnih parametara, potrebno je izračunati prosječnu brzinu vjetra na visini rotora vjetroagregata. Budući da brzina vjetra varira s obzirom na visinu, ista se može izračunati koristeći se izrazom

$$U_{(z)} = U_{(h_r)} \left( \frac{z}{h_r} \right)^m \quad (7.2.1.)$$

Gdje je  $U$  brzina vjetra,  $z$  visina centra rotora vjetroagregata,  $h_r$  referentna visina, i  $m$  je eksponent koji ovisi o hrapavosti površine. Eksponent  $m$  se dobiva iz  $z_0$  izrazom:[19]

$$m = 0.096 \log_{10}(z_0) + 0.0.16(\log_{10}(z_0))^2 + 0.24 \quad (7.2.2.)$$

Dužina hrapavosti površine je parametar definiran vrstom nepravilnosti na površini, kao što su drveće ili građevine. Na mjestima gdje nema prepreka, kao što su ravne livade ili površina mora, dužina hrapavosti  $z_0$  može biti visine milimetra, ali u gustim gradskim područjima ili šumama dužina hrapavosti  $z_0$  površine može biti visine metra. Prema danom izrazu, što se visina iznad tla  $z$  povećava, hrapavost površine  $z_0$  se smanjuje, i brzina vjetra  $U_{(z)}$  se povećava.[10] Vrijednosti koje opisuju hrapavost površine mogu se iščitati iz tablice 1, gdje su vrijednosti za  $m$  dobivene iz izraza (7.2.1.)[12]

Tablica 1. Ovisnosti dužine hrapavosti o terenu.

Vrsta terena	$z_0(mm)$	$m$
Smireno otvoreno more	0.2	0.104
Snijeg	3.0	0.100
Gruba livada	10.0	0.112
Usjevi	50.0	0.131
Raštrkana drveća	100.0	0.160
Mnogo drveća	250.0	0.188
Šuma	500.0	0.213
Predgrađe	1500.0	0.257
Centar grada	3000.0	0.289

Uzimajući u obzir visinu tornja 11 metara i površinsku hrapavost može se dobiti brzina vjetra i ona iznosi



$$U_{(9)} = 6.03 \left( \frac{11}{10} \right)^{0.112} = 6.09 \text{ m/s} \quad (7.2.3.)$$

Definiranjem brzine vjetra na lokaciji i koristeći se zadanim parametrima, moguće je odrediti osnovne parametre vjetroagregata. Stoga, ako je brzina vjetra na lokaciji  $6 \text{ m/s}$ , a zadani rad vjetroagregata je  $4000 \text{ kWh}$ , moguće je dobiti okvirni promjer rotora koji će zadovoljiti definirane uvjete.

$$AEO = 1.600539 \cdot D^2 \cdot U^3 \quad (7.2.4.)$$

Gdje je AEO procijenjena godišnja pretvorba energije ( $\text{kWh}$ ),  $D$  je promjer rotora ( $\text{m}$ ), a  $U$  prosječna brzina vjetra ( $\text{m/s}$ ), te dobivamo da promjer rotora iznosi.

$$D = \sqrt{\frac{AEO}{1.600539 \cdot U^3}} = 3.32 \text{ m} \quad (7.2.5.)$$

Iz izraza se dobiva okvirni promjer rotora koji bi zadovoljavao potrebe od  $4000 \text{ kWh}$  godišnje, za brzinu vjetra  $6.03 \text{ m/s}$ .

Na temelju parametara odabrana je dužina lopatica od  $1.55$  metara, stoga moguće je izračunati površinu rotora  $A$  prema izrazu:

$$A = r^2 \pi = 7.54 \text{ m}^2 \quad (7.2.6.)$$

Gdje je  $A$  površina rotora, a  $r$  polumjer rotora. Odabirom lopatica dobiveni su i ostali bitni parametri za proračun vjetroagregata. Koeficijent snage je procijenjen na  $40\%$ , stoga moguće je izračunati snagu vjetroagregata prema izrazu:

$$P = C_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot U^3 = 408 \text{ W} \quad (7.2.7.)$$

Gdje je  $P$  snaga vjetroagregata,  $C_p$  je koeficijent snage,  $\rho$  označava gustoću zraka, a  $U$  označava prosječnu brzinu vjetra koja struji ka rotoru vjetroagregata.

### 7.3. IEC 61400-2

Proračun malog vjetroagregata vršiti će se prema IEC modelu za jednostavna naprezanja malih vjetroagregata. IEC 61400-2 definira mali vjetroagregat koji ima površinu rotora manju od  $200 m^2$ , koja u grubo odgovara nazivnoj snazi od  $50 kW$ . Standard određuje još jednu vrstu koja spada u male vjetroagregate, a to su mikroagregati sa površinom rotora od  $2m^2$  ili manjom; ovi agregati mogu se certificirati posebno, bez tornja, dok ostali veći vjetroagregati moraju se certificirati sa tornjem.[12]

IEC 61400-2 dozvoljava provođenje sigurnosne analize vjetroturbine kroz tri metode:[12]

1. „Jednostavni model naprezanja“(SLM, Simple load model) kombinira izravne i jednostavne jednadžbe za glavna naprezanja sa visokim sigurnosnim faktorom. Kao što ime govori, najjednostavnija je proračunska metoda i ona je jedina detaljno opisana u ovom radu.
2. „Aero-elastično“ modeliranje uključuje preciznije kompjutorsko modeliranje naprezanja vjetroturbine u odnosu na stohastičke ulaze kao što su promjene smjera vjetra i naleta vjetra. Ova metoda se većinom koristi za velike vjetroturbine. Jednadžbe korištene za izračunavanje naleta vjetra i smjera vjetra u IEC 61400-2 za aero-elastično proračunavanje su jednake jednadžbama koje se koriste za velike vjetroturbine u IEC 61400-1. Glavni problem sa aero-elastičnim proračunom je visoka cijena softvera i vrijeme potrebno za njegovu implementaciju, i zato se aero-elastična metoda proračuna ne koristi kod proračuna malih vjetroturbina.
3. Mjerenje naprezanja sa ekstrapolacijama za ekstremne uvjete. Očito ova metoda potražuje terensko testiranje, za razliku od ostale dvije metode gdje se one mogu primijeniti za vrijeme projektiranja.

SLM metoda je jedinstvena za IEC 61400-2 standard malih vjetroturbina. Razvijen je kao jeftina alternativa složenoj i skupoj aero-elastičnoj metodi koja se rutinski koristi za velike vjetroturbine. Trošak kod SLM je visoki faktor sigurnosti.

Većina oznaka korištenih u IEC 61400-2 se koristi i u ovom radu, ali postoji nekoliko većih razlika, koje su prikazane u tablici 2

Prvi korak pri primjeni SLM metode je odlučivanje o klasi vjetroturbine kao što je označeno u tablici 3.

Tablica 2 Razlike u označavanju u odnosu na IEC 61400-2

Definicija	Korišteni simbol	Simbol korišten u IEC 61400-2
Moment inercije ( $kg\ m^3$ )	$J$	$I$
Broj lopatica	$N$	$B$
Brzina vjetra ( $m/s$ )	$U$	$V$
Broj ponavljanja do zamora	$N_{cycles}$	$N$
Brzina skretanja	$\omega$	$\omega_{yaw}$
Kutna brzina lopatica ( $rad/s$ )	$\Omega$	$n\ (o/min), \omega_n$

Tablica 3 IEC klase vjetroturbine

Klasa	I	II	III	IV	Specijalna(S)
$U_{ref}$	50	42.5	37.5	30	
$U_{ave}$	10	8.5	7.5	6	

Tablica 4 uzeta iz standarda IEC 61400-2, definirana je sa deset slučajeva naprezanja koje sastavljaju jednostavni model naprezanja. Važno je opaziti da je samo u slučaju A vrsta naprezanja na zamor.

#### 7.4. Jednostavni model naprezanja

Ovaj model može se primijeniti samo na vjetroturbine sa horizontalnom osi koje imaju dvije ili više lopatice i kruto središte. Svi IEC standardi isključuju vjetroturbine sa vertikalnom osi.[12]

Prvi korak podrazumijeva prikupljanje i određivanje sljedećih parametara:

- Proračunska brzina okretaja,  $\Omega_{design} = 300\ min^{-1} = 31.42\ rad/s$
- Proračunska brzina vjetra  $U_{design} = 1.4U_{ave} = 8.53\ m/s$
- Proračunski moment vratila  $Q_{design}$
- Maksimalna brzina skretanja  $\omega_{yaw,max}$
- Maksimalna brzina okretaja  $\Omega_{max} = 500\ min^{-1} = 52.36\ rad/s$  (Tablica 5)
- Proračunska snaga  $P_{design} = C_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot U_{design}^3 = 1123\ W$

Proračunska snaga  $P_{design}$ , brzina vjetra  $U_{design}$  i kutna brzina  $\Omega_{design}$  su definirani tipom i oblikom lopatice za pretvorbu energije. Druga stavka podrazumijeva da je  $U_{ave} = 6.09 \text{ m/s}$ , i iz (tablica 3) IEC61400-2,  $U_{ref} = 30 \text{ m/s}$  i prema IEC 10  $U_{e50} = 1.4U_{ref} = 42 \text{ m/s}$ , što je procijenjena maksimalna brzina vjetra iz svih slučajeva opterećenja.

Tablica 4. Slučajevi opterećenja jednostavnog modela opterećenja

Režim rada	Oznaka proračuna	Opis	Vrsta analize
Proizvodnja energije	A	Normalni rad	Zamor
	B	Skretanje (Yaw)	Krajnja
	C	Pogreška pri skretanju	Krajnja
	D	Maksimalni potisak	Krajnja
	E	Maksimalna brzina okretanja	Krajnja
	F	Naprezanja pri kratkom spoju	Krajnja
Gašenje	G	Gašenje (kočenje)	Krajnja
Parkiranje(prazan hod ili zastoje)	H	Stacionarno opterećenje	Krajnja
Parkiranje kod stanja kvara	I	Stacionarno opterećenje (pri maksimalnoj izloženosti)	Krajnja
Transport,sklapanje, održavanje i popravci	J	Po opisu proizvođača	Krajnja

Proračunska brzina rotacije je određena aerodinamičkim razmatranjima dok je maksimalna brzina rotacije ograničena zaštitom od prevelikog broja okretaja, tj. savijanjem.[12] Savijanje je mehanizam zaštite vjetroagregata od visokih brzina vjetra. Mehanizam skretanja koristi težinu repa vjetroagregata kako bi vratio rotor u normalni radni položaj, tada su momenti zakretanja u ravnoteži i os rotora je usmjerena ka smjeru vjetra. Prilikom povećanja brzine vjetra, sila vjetra prevladava težinu repa vjetroagregata, što čini neravnotežu u silama zakretanja, i samo skretanje.[10]

Tablica 5 Popis indeksa i kordinata

<b>Indeks</b>	<b>Značenje</b>
<i>ave</i>	Prosjek
<i>B</i>	Lopatica
<i>cog</i>	Središte gravitacije(mase)
<i>design</i>	Ulazni parametar za pojednostavljene proračunske izraze
<i>e50</i>	Extrem, jednom u 50 godina
<i>f</i>	Opterećenja (primjenjivo se samo za sigurnosne faktore)
<i>hub</i>	Nosač lopatica, centar rotora
<i>m</i>	Materijal (primjenjivo se samo za sigurnosne faktore)
<i>max</i>	Maksimum
<i>r</i>	Rotor
<i>s</i>	Vratilo
<i>x</i>	Lopatica: horizontalni smjer – daje pozitivan moment u smjeru rotacije
<i>x</i>	Vratilo: horizontalni smjer – takav da pozitivni moment djeluje u smjeru rotacije
<i>y</i>	Lopatica: horizontalni smjer – takav da pozitivni moment djeluje u smjeru rotacije
<i>z</i>	Lopatica: u smjeru vrha

Za proračunsku snagu  $P_{design}$  izraženu u Wattima, učinkovitost,  $\eta$ , se uzima prema izrazu

$$\eta = \begin{cases} (0.6 + 0.005P_{design}) & \text{za } P_{design} < 20 \text{ kW} \\ 0.7 & \text{za } P_{design} > 20 \text{ kW} \end{cases} \quad (7.4.1.)$$

Uzimajući u obzir da je snaga u kW, učinkovitost iznosi

$$\eta = 0.6 + 0.005 \times 1.123 = 0.605 \quad (7.4.2.)$$

Proračunska snaga,  $P_{design}$ , je određena proračunskom brzinom vjetra, a proračunski

moment  $Q_{design}$  je izražen izrazom:

$$Q_{design} = \frac{30P_{design}}{\eta\pi\Omega_{design}} = 59.08 Nm \quad (7.4.3.)$$

Omjer brzine vrhova lopatice  $\lambda_{design}$  može se dobiti iz sljedećeg izraza

$$\lambda_{design} = \frac{1.55\pi \times 300}{8.53 \cdot 30} = 5.7 \quad (7.4.4.)$$

Maksimalna brzina zakretanja,  $\omega_{yaw,max}$  je određena (u  $rad/s$ ) prema izrazu

$$\omega_{yaw,max} = \left\{ \begin{array}{ll} 3 - 0.01(A_{proj} - 2) & \text{za } A_{proj} > 2m^2 \\ 3 & \text{za } A_{proj} < 2m^2 \end{array} \right\} = 2.94 rad/s \quad (7.4.5)$$

gdje je „projicirana“ površina rotora,  $A_{proj}$ , izražena u  $m^2$ .

#### 7.4.1. Režim rada - slučaj A: Normalni Rad

Prvi slučaj opterećenja pokriva zamor materijala pri normalnom režimu rada vjetroturbine i jedini je slučaj opterećenja zamorom. Implicitno se pretpostavlja da se abnormalan rad javlja dovoljno rijetko da ne bi dodatno utjecao na vrijeme zamora. Svi izrazi u ovom pod-poglavlju definiraju vršna naprezanja nastale pretpostavljenim cikličkim naprezanjem koji se izmjenjuje između 1.5 i 0.5 proračunskih veličina kutne brzine i momenta. Prvi izraz se odnosi na centrifugalno opterećenje koji uključuje dva parametra koja još nisu određena  $m_B$ , masa lopatice, koja je definirana u dokumentaciji proizvođača i iznosi 3.5 kg, i težište lopatice  $R_{cog}$  koji je izvučen iz programa u kojem su modelirane lopatice, te iznosi 0.495 m.

$$\Delta F_{zB} = 2m_B R_{cog} \Omega^2 = 3420 N \quad (7.4.6.)$$

Sljedeća dva izraza, redosljedom vodeći zaostatak u (smjeru rotacije) i moment savijanja okomito na smjer rotacije (u smjeru vjetra):

$$\Delta M_{xB} = \frac{Q_{design}}{N} + 2m_B g R_{cog} = 53.7 Nm \quad (7.4.7.)$$

$$\Delta M_{yB} = \frac{\lambda_{design} Q_{design}}{N} = 112.4 Nm \quad (7.4.8.)$$

Ovi momenti se odnose na korijen lopatice sa najmanjom krajnjom čvrstoćom.

Potrebno je zamijetiti da većina lopatica vjetroturbine su vrlo krute u smjeru rotacije, stoga kada se govori o savijanju implicira se poprečno savijanje, tj. savijanje okomito na smjer rotacije lopatica.

Preko sljedeće tri jednačbe mogu se izraziti vršna zamorna opterećenja na vratilo vjetroturbine. Pretpostavka je da sljedeća opterećenja djeluju na vratilu između prvog ležaja i rotora:

$$\Delta F_{x-vratilo} = \frac{\lambda_{design} Q_{design}}{2R} = 326.2 N \quad (7.4.9.)$$

Koristeći izraz za ekscentričnost rotora  $e_r = 0.005R$ , i masu rotora,  $m_r$  koja iznosi 12.6 kg, a  $L_{rb}$  je oznaka za udaljenost rotora od prvog ležaja, obično prije generatora, i ona iznosi 0.026 m.

$$\Delta M_{x-vratilo} = Q_{design} + 2m_r g e_r = 61 Nm \quad (7.4.10.)$$

$$M_{vratilo} = 2m_r g L_{rb} + \frac{R}{6} \Delta F_{x-vratilo} = 90.7 Nm \quad (7.4.11.)$$

#### 7.4.2. Režim rada - slučaj B: Zakretanje

Izraz za maksimalni moment savijanja korijena lopatice  $M_{yB}$  je

$$M_{yB} = m_B \omega_{max}^2 L_{rt} R_{cog} + 2\omega_{max} J_B \Omega + \frac{R}{9} \Delta F_{x-vratilo} = 218 Nm \quad (7.4.12.)$$

Gdje  $L_{rt}$  je udaljenost od rotora do osi zakretanja (tornja), i ona iznosi 0.218 , a  $J_B$  označava moment inercije lopatica. Inercija se može procijeniti izrazom  $J_B \approx m_B R_{cog}^2$ , ili putem programa u kojem je model napravljen, stoga  $J_B$  iznosi  $J_B \approx 0.857 kgm^2$

Moment na vratilu za vjetroturbinu sa tri ili više lopatica dobiva se preko izraza

$$M_{shaft} = N\omega_{yaw} \Omega J_B + m_r g L_{rb} + \frac{R}{6} \Delta F_{x-vratilo} = 325 \text{ Nm} \quad (7.4.13.)$$

Za  $N > 1$ , prosječni potisak na lopaticu ne utječe na moment vratila. Iskustvo je pokazalo da na moment vratila prevladavaju žiroskopski uvjeti, uključujući  $\omega_{max}$ .

#### 7.4.3. Režim rada - slučaj C: Pogreška Zakretanja

Ovo opterećenje se javlja kada je vjetroturbina u radu sa prosječnom pogreškom zakretanja. Zbog jednostavnosti ovaj slučaj razmatra jediničnu pogrešku od  $30^\circ$ . Pogreška zakretanja stvara moment savijanja na lopaticama prema:

$$M_{yB} = \frac{1}{8} \rho A_{proj,B} C_{l,max} R^3 \Omega_{design}^2 \left[ 1 + \frac{4}{3\lambda_{design}} + \left( \frac{1}{\lambda_{design}} \right)^2 \right] = 307.3 \text{ Nm} \quad (7.4.14.)$$

Gdje je  $A_{proj,B}$  i iznosi 0.216 projicirana površina lopatica, a  $C_{l,max}$  je maksimalni koeficijent uzgona i iznosi  $C_{l,max} = 2$  ako vrijednost nije zadana.

#### 7.4.4. Režim rada - slučaj D: Maksimalni Potisak

Ovo je problematično opterećenje jer se isto povećava sa kvadratom brzine vjetra, stoga odabir dovoljno visoke brzine vjetra, će proizvesti vrlo visoka opterećenja. Usvojeni kompromis iz IEC61400-2 je koristiti izraz

$$F_{x-vratilo} = 3.125 C_T \rho U_{ave}^2 \pi R^2 = 535.8 \text{ N} \quad (7.4.15.)$$

Gdje je  $C_T$  koeficijent potiska, uzet kao 0.5. Faktor 3.125 je dobiven primjenom (7.4.15.) na brzinama vjetra  $U = 2.5U_{ave}$ , za kojeg se tvrdi da daje potisna opterećenja usporediva sa dobivenima provođenjem aero-elastičnog modeliranja lopatica malih vjetroturbina. Potisak se također prenosi na toranj, što čini, uz težinu turbine i žiroskopska opterećenja opisana iznad, glavne načine kako opterećenja na turbinu utječu na opterećenja tornja.

#### 7.4.5. Režim rada - slučaj E: Maksimalna Brzina Rotacije

Centrifugalna sila na lopaticu, posebice na korijen lopatica može se ekstremno



povećati kod visokih brzina okretaja. Centrifugalno opterećenje u korijenu lopatice se računa iz izraza:

$$F_{zB} = m_B \Omega_{max}^2 R_{cog} = 4749 \text{ N} \quad (7.4.16.)$$

A moment savijanja vratila zbog malih nesavršenosti lopatica, što čini neravnotežu se računa izrazom:

$$M_{shaft} = m_r g L_{rb} + m_r e_r \Omega_{max}^2 L_{rb} = 10.1 \text{ Nm} \quad (7.4.17.)$$

#### 7.4.6. Režim rada - slučaj F: Kratak spoj Električnih Instalacija

Ako se dogodi direktan kratki spoj na izlaznim terminalima generatora, stvara se veliki moment na vratilu turbine kao rezultat povećanja okretnog momenta, poznatog kao moment kratkog spoja. Izračunati momenti u nastavku se javljaju pri kratkom spoju generatora

$$M_{x-vratila} = G Q_{design} = 118 \text{ Nm} \quad (7.4.18.)$$

i;

$$M_{xB} = \frac{M_{x-vratila}}{N} = 39.3 \text{ Nm} \quad (7.4.19.)$$

Gdje je numerički faktor  $G = 2.0$  osim ako je dana preciznija vrijednost.

Režim rada G, kada vjetroturbina se prisilno gasi, tj. kočii nije moguće proračunati, budući da nije predviđen mehanizam kočenja.

#### 7.4.7. Režim rada - slučaj H: Opterećenje pri Zastoju

Ovaj slučaj opterećenja razmatra nekoliko pojedinih opterećenja koja djeluju na parkirani vjetroagregat, tj. vjetroagregat čiji rotor se ne okreće i time ne proizvodi električnu energiju. Opterećenja se računaju koristeći brzinu vjetra  $U_{e50}$ , 50-godišnji ekstrem brzine vjetra. Pretpostavljeno je da je vjetroturbina skrenula tj. zaštitila se skretanjem rotora od vjetra i lopatice su stacionarne, stoga koristimo sljedeći izraz

$$M_{yB} = \frac{1}{4} C_d \rho U_{e50}^2 A_{proj,B} R = 271 Nm \quad (7.4.20.)$$

Gdje je koeficijent otpora  $C_d = 1.5$  usvojen iz tablice 6

$$F_{x-vratila} = \frac{1}{2} N C_d \rho U_{e50}^2 A_{proj,B} = 1050 N \quad (7.4.21.)$$

Tablica 6. Koeficijent sile za slučaj naprezanja H iz IEC 61400-2

	Krug	Osmerokut	Kvadrat	Nepomično tijelo ili profil lopatice pod 90°	Pomični profil lopatice
Karakteristična dužina < 0.1 m	1.3	1.3	1.5	1.5	2.0
Karakteristična dužina > 0.1 m	0.7	1.2	1.5	1.5	2.0

## 7.5. Proračun naprezanja i faktori sigurnosti

Za opterećenja izračunata u prijašnjoj sekciji potrebno je izraziti u nazivnim naprezanjima komponenti, kako bi se mogli usporediti sa dopuštenim granicama naprezanja. Granice naprezanja proračunavaju se istom metodom neovisno je li korištena SLM ili aero-elastična analiza.

### 7.5.1. Nazivna naprezanja komponenti

Prateći proračun, pojedine sile i momenti se kombiniraju kako bi se dobilo konačno nazivno naprezanje ključnih komponenti na koje djeluje opterećenje, glavno vratilo i korijen lopatica. Formule koje će se koristiti dane su u tablici 7. Pri proračunu nazivnih naprezanja potrebno je uzeti u obzir nekoliko ključnih faktora:

- Varijacije naprezanja na komponenti
- Koncentracije naprezanja
- Veličina i smjer rezultanti naprezanja i opterećenja

- Variranje dimenzija komponenti
- Vrsta napora na komponenti
- Svaki proizvodni proces izveden na komponentama kao što je varenje, strojna obrada itd.

Tablica 7. Formule nazivnog naprezanja iz IEC 61400-2

	Okrugli korijen lopaticice	Kvadratni korijen lopaticice	Vratilo rotora
Aksijalno opterećenje	$\sigma_{zB} = \frac{F_{zB}}{A_{zB}}$	$\sigma_{zB} = \frac{F_{zB}}{A_{zB}}$	$\sigma_{x-vratila} = \frac{F_{x-vratila}}{A_{vratila}}$
Savijanje	$\sigma_{MB} = \frac{\sqrt{M_{xB}^2 + M_{yB}^2}}{W_B}$	$\sigma_{MB} = \frac{M_{xB}}{W_{xB}} + \frac{M_{yB}}{W_{yB}}$	$\sigma_{M-vratila} = \frac{M_{vratila}}{W_{vratila}}$
Smicanje	Neznatno	Neznatno	$\tau_{M-vratila} = \frac{M_{x-vratila}}{2W_{vratila}}$
Kombinirano (aksijalno i savijanje)	$\sigma_N = \sigma_{zB} + \sigma_{MB}$		$\sigma_N = \sqrt{(\sigma_{x-vratila} + \sigma_{M-vratila})^2 + 3\tau_{M-vratila}^2}$

Tablica 8. parcijalni faktor sigurnosti za SLM opterećenja

Metoda određivanja opterećenja	Faktor sigurnosti za zamorna opterećenja, $\gamma_f$	Faktor sigurnosti za krajnja opterećenja, $\gamma_f$
Jednostavni proračun opterećenja	1.0	3.0
Aero-elastično modeliranje	1.0	1.35
Mjerenja opterećenja sa ekstrapolacijom	1.0	3.0

Tablica 9. Parcijalni faktor sigurnosti materijala

Stanje	Potpuna karakterizacija	Minimalna karakterizacija
Zamorna čvrstoća	1.25	10.0
Krajnja čvrstoća	1.1	3.0

Kako bi se izračunala naprezanja potrebno je odrediti još nekoliko parametara, uglavnom površine pod oznakom  $A$ , vrijednosti za moment otpora presjeka,  $W$ , moment inercije podijeljen sa udaljenosti težišta do točke maksimalnog naprezanja. Što je najudaljenija točka na komponenti od neutralne osi, koja prolazi težištem. Promjer vratila vjetroagregata je postavljen kao  $d_{vratila} = 50 \text{ mm}$ , stoga

$$A_{vratila} = r^2 \pi = 1.96 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \quad (7.5.1.)$$

Moment inercije za okruglo vratilo je

$$I_{x-vratila} = \frac{\pi r_{vratila}^4}{4} = 3.068 \times 10^{-7} \text{ m}^4 \quad (7.5.2.)$$

i

$$W_{vratila} = \frac{d^3 \pi}{32} = 1.22 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \quad (7.5.3.)$$

Korijen lopatice je uzet kao najmanji poprečni presjek lopatice, kao što je potvrđeno napravljenim modelom lopatice. Dobivena je površina presjeka korijena lopatice

$$A_B = 2.242 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \quad (7.5.4.)$$

CAD model je korišten za odrediti ostale momente oko osi definiranih u Dodatku 2 IEC 61400-2 standarda:

$$I_{xx} = 1.30 \times 10^{-3} \text{ m}^4 \quad i \quad I_{yy} = 1.32 \times 10^{-3} \text{ m}^4 \quad (7.5.5.)$$

I odgovarajuće udaljenosti do točke naprezanja su

$$c_{xB} = 0.138 \text{ m} \quad i \quad c_{yB} = 0.0173 \text{ m} \quad (7.5.6.)$$

Stoga,

$$W_{xB} = \frac{I_{xx}}{c_{xB}} = 9.45 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \quad (7.5.7.)$$

$$W_{yB} = \frac{I_{yy}}{c_{yB}} = 7.64 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \quad (7.5.8.)$$

Koeficijenti sigurnosti i maksimalna granica čvrstoće,  $f_k$ , određuju maksimalno dopušteno naprezanje  $\sigma_{dop}$  u svakoj komponenti prema:

$$\sigma_{dop} = \frac{f_k}{\gamma_m \gamma_f} \quad (7.5.9.)$$

Gdje je  $f_k$  maksimalna granica čvrstoće, ovdje uzeto kao naprezanje granice tečenja,  $\gamma_f$  je djelomični faktor sigurnosti usvojen prema tablici 8, a  $\gamma_m$  je specifičan parcijalni faktor sigurnosti materijala usvojen iz tablice 9. Drugim riječima, dva parcijalna faktora sigurnosti se množe, kako bi se dobio krajnji faktor sigurnosti.

Kako bi dizajn određene komponente bio siguran za korištenje, tada nazivna naprezanja istih moraju biti niža od maksimalnih dopuštenih naprezanja.

$$\sigma_N < \sigma_{dop} \quad (7.5.10.)$$

### 7.5.2. Nazivno naprezanje za slučaj A: Normalni rad

Slučaj A je jedino opterećenje na zamor. Međutim, biti će ispod prikazano da prosječno nazivno naprezanje je još uvijek potrebno za završetak analize. Budući da je korijen lopatice pravokutnog poprečnog presjeka koristiti će se izrazi iz drugog stupca tablice 7.

$$\sigma_N = \frac{\Delta F_{zB}}{A_B} + \frac{\Delta M_{xB}}{W_{xB}} + \frac{\Delta M_{yB}}{W_{yB}} = 1.53 \text{ MPa} \quad (7.5.11.)$$

$$\sigma_N = \sqrt{\left(\frac{\Delta F_{x-vratila}}{A_{vratila}} + \frac{\Delta M_{vratila}}{W_{vratila}}\right)^2 + 3 \left(\frac{\Delta M_{x-vratila}}{2W_b}\right)^2} = 16.93 \text{ MPa} \quad (7.5.12.)$$

### 7.5.3. Nazivno naprezanje za slučaj B: Zakretanje

Izraz za korijen lopatice:

$$\sigma_N = \frac{M_{yB}}{W_{yB}} = 0.03 \text{ MPa} \quad (7.5.13.)$$

Maksimalno naprezanje u vratilu je

$$\sigma_N = \frac{M_{vratila}}{W_{vratila}} = 51.78 \text{ MPa} \quad (7.5.14.)$$

### 7.5.4. Nazivno naprezanje za slučaj C: Greška u Zakretanju

Slučaj opterećenja C uzima u obzir samo moment savijanja na lopaticama, prema izrazu

$$\sigma_N = \frac{M_y}{W_{yB}} = 0.04 \quad (7.5.15.)$$

### 7.5.5. Nazivno naprezanje za slučaj D: Maksimalni potisak

Prema slučaju opterećenja C, D uzima u obzir samo opterećenje na glavnom vratilu

$$\sigma_N = \frac{F_{x-vratila}}{A_{vratila}} = 0.43 \text{ MPa} \quad (7.5.16.)$$

### 7.5.6. Nazivno naprezanje za slučaj E: Maksimalna brzina okretanja

Opterećenje u ovom slučaju ponovno uzima u obzir samo jedno opterećenje za glavno vratilo i korijen lopatice. Nazivno naprezanje za korijen lopatice se računa prema izrazu:

$$\sigma_N = \frac{F_{zB}}{A_B} = 2.12 \text{ MPa} \quad (7.5.17.)$$

$$\sigma_N = \frac{M_{vratila}}{W_{vratila}} = 1.62 \text{ MPa} \quad (7.5.18.)$$

### 7.5.7. Nazivno naprezanje za slučaj F: Kratki Spoj Električnih Instalacija

Slučaj opterećenja F također uzima u obzir jedno opterećenje i za glavno vratilo i korijen lopatice. Ponovno, proračun za nazivno naprezanje je jasan.

$$\sigma_N = \frac{M_{xB}}{W_{xB}} = 0.04 \text{ MPa} \quad (7.5.19.)$$

$$\sigma_N = \sqrt{3} \frac{M_{vratila}}{2W_{vratila}} = 16.3 \quad (7.5.20.)$$

### 7.5.8. Nazivno naprezanje za slučaj H: Opterećenje pri Zastoju

Nazivna naprezanja za korijen lopatice:

$$\sigma_N = \frac{M_{yB}}{W_{yB}} = 0 \text{ MPa} \quad (7.5.21.)$$

I za vratilo

$$\sigma_N = \frac{F_{x-vratila}}{A_{vratila}} = 0.84 \text{ MPa} \quad (7.5.22.)$$

SLM(*Simple load model*) nudi jednostavniji način proračunavanja malih vjetroturbina od skupe alternative aero-elastičnog modeliranja koji se rutinski koristi pri proračunavanju velikih vjetroturbina.

Tablica usporedbe dopuštenih naprezanja i izračunatih

Slučaj A – Opterećenje na zamor na lopatice i vratilo			
	Zamorna granica štete	Šteta zamora	Zaključak
Lopatice	1.00	$9.65 \times 10^{-7}$	Sigurno
Vratilo	1.00	Neznatna šteta	Sigurno
Slučaj B – Opterećenje prilikom zakretanja			
	Dopušteno naprezanje (MPa)	Izračunato naprezanje (MPa)	Zaključak
Lopatice	22.22	0.03	Sigurno
Vratilo	55.56	51.78	Sigurno
Slučaj C – Opterećenje prilikom greške u zakretanju			
	Dopušteno naprezanje (MPa)	Izračunato naprezanje (MPa)	Zaključak
Lopatice	22.22	0.04	Sigurno

Slučaj D – Maksimalni potisak na vratilo			
	Dopušteno naprezanje (MPa)	Izračunato naprezanje (MPa)	Zaključak
Lopatice	22.22	0.43	Sigurno
Slučaj E – Maksimalna brzina okretanja			
	Dopušteno naprezanje (MPa)	Izračunato naprezanje (MPa)	Zaključak
Lopatice	22.22	1.62	Sigurno
Vratilo	55.56	2.21	Sigurno
Slučaj F – Kratki Spoj Električnih Instalacija			
	Dopušteno naprezanje (MPa)	Izračunato naprezanje (MPa)	Zaključak
Lopatice	22.22	0.04	Sigurno
Vratilo	55.56	16.27	Sigurno
Slučaj G – Kočenje pri gašenju			
	Dopušteno naprezanje (MPa)	Izračunato naprezanje (MPa)	Zaključak
Lopatice	22.22	/	/
Vratilo	55.56	/	/
Slučaj H – Opterećenje pri zastoju			
	Dopušteno naprezanje (MPa)	Izračunato naprezanje (MPa)	Zaključak
Lopatice	22.22	0.84	Sigurno
Vratilo	55.56	0	Sigurno

## 8. TORANJ

Ova analiza uzima u obzir samo generalni dio proračuna tornja, bez montažnih nastavaka kao što prirubnica za montažu turbine, i temeljne ploče. Ostali važni detalji uključuju odabir vijaka za temelje, smještaj pristupnog poklopca i ojačanja za dno tornja kao što se koristi kod vjetroturbina velikih snaga. Inače potrebna je potpuna trodimenzionalna analiza konačnih elemenata kako bi se te komponente proračunale. Preostale parametre koje je moguće izračunati za jednostavan proračun tornja su odabir oblika poprečnog presjeka, debljina stijenke čelika u svakom presjeku,  $t$ , i promjeru dna tornja. Takve vrijednosti trebaju biti izabrane kako bi podnijele opterećenja na vjetroturbinu, kao i samu težinu tornja i opterećenje vjetra. Dodatno, potrebno je izračunati horizontalnu silu i moment prevrtanja prije proračunavanja temelja. [12]



Horizontalna sila na toranj u ekstremnim uvjetima, sa brzinom vjetra od 50 m/s, je puno veća od  $T_{max}$ . Što znači da je potrebno pridodati pažnje odabiru oblika tornja, primjerice okrugli poprečni presjek tornja ima manji koeficijent otpora u odnosu na osmerokutni poprečni presjek. Međutim zašiljene tornjeve osmerokutnog presjeka je jednostavnije za izraditi. Stup se izrađuje tako da se dvije savijene polovice međusobno vare i galvaniziraju, takve sekcije se mogu međusobno spajati nabadanjem, budući da su sekcije šiljaste. Za razliku od stupova javne rasvjete, koji se koriste samo silu trenja, stupove za vjetroagregate je potrebno osigurati vijčanim spojevima, kako se stup ne bi rastavio prilikom opterećenja. Alternativno moguće je spojeve izvesti prirubnicama. Zbog jednostavnosti, detalji prirubnica i vijaka, nisu proračunati u ovoj analizi. [12]

Horizontalni otpor stupa  $D(y)$ , za jedinicu visine  $s$  obzirom na dan je izrazom

$$D(y) = \frac{1}{2} \rho U^2(y) C_d d(y) \quad (8.1.)$$

Gdje je  $d(y)$  promjer poprečnog presjeka, a  $C_d$  je koeficijent otpora koji je definiram odgovarajućim standardom. Promjena u brzini vjetra može se dobiti računom, međutim poneki standardi zahtijevaju korištenje maksimalne brzine vjetra na svim visinama. Zbog jednostavnosti, konstantna brzina vjetra  $U$  će se koristiti. Naprezanje zbog aerodinamičkog otpora će se dobiti računanjem sile smicanja  $V$ : [12]

$$V = - \int D(y) dy \quad (8.2.)$$

I zatim momenta  $M(y)$ : [12]

$$M = \int V(y) dy \quad (8.3.)$$

Sa prikladnim graničnim vrijednostima sa  $y = 0$ . Izrazi 8.2. i 8.3. su derivirani u standardnim udžbenicima konstrukcijskog projektiranja. Za linearno skošenje [12]

$$d(y) = d_0 \frac{d_h - d_0}{h} y = d_0 d_1 y \quad (8.4.)$$

Kada se devijacija zbog spoja trenjem zanemari,  $d_1$  je skošenje. Koristeći se izrazom, dobiva se sljedeći izraz za ukupni moment  $M(y)$ : [12]

$$M(y) = M_0 + T_{max}y + \frac{1}{2}\rho U^2 C_d \left( \frac{d_0}{2} y^2 \frac{d_1}{6} y^3 \right) \quad (8.5.)$$

kada se ubroji  $T_{max}$ , granična vrijednost naprezanja,  $V$  i moment koji djeluje na toranj  $M_0$ .  $M_0$  može se pojaviti zbog nekoliko uzroka, kao što su žiroskopska ili ciklička opterećenja na osovinu vjetroturbine ili veći prevjes vrha tornja. Zbog jednostavnosti, pretpostavljeno je da  $T_{max}$  i  $M_0$  djeluju na  $y = 0$ . Izraz je oblika[12]

$$M(y) = a_0 + a_1 y + a_2 y^2 + a_3 y^3 \quad (8.6.)$$

korišten u programu koji će biti opisan. Na svakoj visini, maksimalno naprezanje savijanja,  $\sigma_{b,max}$ , javlja se na udaljenosti  $d/2$  od težišta i dano je [12]

$$\sigma_{b,max} = \frac{M(y)d(y)}{2I(y)} \quad (8.7.)$$

Gdje je  $I$ , moment inercije površine pravilnog osmerokuta sa debljinom stijenke  $t$ , je[12]

$$I(y) \approx 0.05474[d^4(y) - (d(y) - 2t)^4] \quad (8.8.)$$

Treba uzeti u obzir da je debljina stijenke konstantna u svakoj sekciji, ali može varirati s obzirom na sekciju. Dodavanjem aksijalnog naprezanja zbog težine turbine  $m_{tt}$ , i težini samog tornja  $m_t(y)$ , daje [12]

$$\sigma_{max} = \sigma_{b,max} + \frac{[m_{tt} + m_t(y)]g}{A(y)} \quad (8.9.)$$

Gdje  $g$  je ubrzanje zbog gravitacije, a površina poprečnog presjeka  $A(y)$ , je [12]

$$A(y) = \frac{2}{1 + \sqrt{2}} [(d^2(y) - (d(y) - 2t)^2)] \approx 3.3137t[d(y) - t] \quad (8.10.)$$

Povećanje naprezanja sa  $y$  obično zahtijeva da se debljina stjenke,  $t$ , povećava sa nižim sekcijama. Stoga višedijelni tornjevi mogu koristiti raspon debljina stjenka kako bi se smanjila težina tornja i trošak. Ostala važna razmatranja dobivena su iz ove analize. Prvi je da lice tornja uz vjetar je vlačno napregnut, dok je lice tornja niz vjetar opterećeno na tlak, stoga potrebno je predvidjeti otpornost stupa na izvijanje. Smjer vjetra može varirati, stoga treba pretpostaviti da maksimalno naprezanje djeluje na zavareno područje između dvije polovice koje čine osmerokut. [12]

Postoji nekoliko načina analiziranja izvijanja, od kojih dva su opisana ovdje. Prvi način je prema ASCE (American society of civil engineers) smjernicama za presjeke pravilnih mnogokuta koji vežu rezultate eksperimenata kako bi odredili ograničavajuće vrijednosti  $a/t$  gdje je  $a$  dužina stranice. Za osmerokute,  $a = d/(1 + \sqrt{2})$ . Za osmerokutne presjeke sa određenom maksimalnom granicom proporcionalnosti  $F_Y$  (mjereno u  $MPa$ ) opći izraz glasi: [12]

$$\frac{a}{t} \sqrt{F_Y} < \begin{pmatrix} 680 & \text{za } \sigma_a < 6.9 \text{ MPa} \\ 630 & \text{inače} \end{pmatrix} \quad (8.11.)$$

Gdje je  $\sigma_a$  (aksijalno) naprezanje zbog aksijalnog opterećenja turbine i mase stupa. Ako je zadovoljena nejednakost, tada  $F_Y$  može biti korištena za proračun i neće biti izvijanja. Ukoliko je lijeva strana veća od određenih graničnih vrijednosti ali manja od 960, tada je dopušteno naprezanje, uzimajući u obzir lokalnu čvrstoću izvijanja, konstrukcije  $F_a$  je [12]

$$F_a < \begin{pmatrix} 1.42F_Y(1.0 - 4.34 \times 10^{-4} \frac{a}{t} \sqrt{F_Y}) & \text{za } \sigma_a < 6.9 \text{ MPa} \\ 1.45F_Y(1.0 - 4.91 \times 10^{-4} \frac{a}{t} \sqrt{F_Y}) & \text{inače} \end{pmatrix} \quad (8.12.)$$

Testiranja nisu se protezali do vrijednosti  $\frac{a}{t} \sqrt{F_Y} > 960$ . Usporedbom odluke metode

konačnih elemenata linearnog faktora izvijanja, i omjera naprezanja potrebnih da induciraju elastično izvijanje podijeljeno sa maksimalnim opterećenjem, Clifton-Smith i Wood otkrili su da je (8.12.) precijenio  $F_a$  za približno  $t < 4.3 \times 10^{-3} m$ , te su predložili sljedeću modifikaciju: [12]

$$F_{a, corr} < \begin{pmatrix} (414t - 0.78)F_a & \text{za } t < 4.3 \times 10^{-3} \\ F_a & \text{inače} \end{pmatrix} \quad (8.13.)$$

Koja će biti korištena u ovom proračunu. Mnogi proračuni koriste faktor kapaciteta  $CF$ , koji se može opisati kao inverzije faktora sigurnosti.  $CT$  je zapravo odnos maksimalnog izračunatog naprezanja i maksimalnog dopuštenog naprezanja,  $F_A$ . Za potrebe proračuna je minimum proporcionalnog naprezanja i rezultata iz (8.13.) [12]

$$F_A = \min(F_Y, F_a) \quad (8.14.)$$

Stoga,

$$CF = \sigma_{max}/F_A \quad (8.15.)$$

Gdje je  $\sigma_{max}$  dan (8.9). Tipično  $CF \leq 0.6$  ako je korištena kranja vlačna čvrstoća.

Potrebno je izračunati još dvije vrijednosti. Prva vrijednost je otklon vrha stupa, koji je očito i maksimalni otklon, te on mora ostati dovoljno mali kako bi opravdali pretpostavku da oblik konstrukcije ne mijenja pod opterećenjem, te posljedično ne poveća opterećenje. Otklon,  $x$  u ovom slučaju, može se izračunati prema standardnoj teoriji grede[12]

$$\frac{d^2x}{dy^2} = \frac{M(y)}{EI(y)} \quad (8.16.)$$

Predviđajući poteškoće pri analitičkom određivanju duplog integrala, rješenje se može pojednostaviti pod uvjetom da  $t \ll d_0$ , te u tom slučaju[12]

$$I(y) \approx 0.43792t(d_0 + d_1y)^3 \quad (8.17.)$$

Ovim pojednostavljenjem, dupli integral (8.16.) se može dobiti.

Glavni podaci stupa i turbine dani su u tablici 10. Promjer baze  $d_h$  i debljina stjenke sekcija su odabrani iterativno s uvjetom da faktori kapaciteta iznose 0.6 ili manje. Važno je zamijetiti da ne postoji očita procedura za određivanje ovih parametara, stoga metoda optimizacije bila bi korisna, štoviše ako je uključena analiza troškova. Sljedeći parametar koji treba primijetiti je potisak turbine  $T_{max}$  koji je određen iz proračuna u prethodnom poglavlju. Parametar  $C_d$  za osmerokutni stup je 1.4 iz AS 1170.2[20]. Ova vrijednost za  $C_d$  je izabrana jer je veća od one u tablici 6. Uobičajeno je da različiti standardi imaju različite uvijete, i činjenica da stup mora zadovoljiti IEC 61400-2, kao i bitne lokalne uvijete, znači da će proračun biti konzervativan. [12]

Tablica 10. Parametri za skošeni stup osmerokutnog poprečnog presjeka

Parametar	Vrijednost	Parametar	Vrijednost	Parametar	Vrijednost
$h$	11 m	$N_s$	3	$U$	30 m/s
$m_{tt}$	150 kg	$T_{max}$	1050 N	$E$	200 GPa
$d_o$	0.15 m	$d_h$	0.35 m	$C_d$	1.4
$F_y$	350 MPa	$\rho_{toranj}$	7800 kg/m <sup>3</sup>	$m_t$	191 kg
$t_1, t_2$	2.5	$t_3$	3 mm		

Za proračun stupa korištena je programska i numerička platforma „MATLAB“. Kod za proračun je preuzet iz Wood[12]. U nastavku se nalazi izlazna poruka programa iz Matlab komandnog prozora. Uneseni parametri odgovaraju slučaju opterećenja H: [12]

```
test(150, 0.15, 0.35, 3, 11, 1050, 30, 0)
The horizontal force on tower is 2.08 kN
The base overturning moment is 21.46 kNm
For section 1 enter thickness in mm: 2.5
For section 2 enter thickness in mm: 2.5
For section 3 enter thickness in mm: 3
The maximum CF for buckling is is 0.5370
The maximum CF for stress is 0.1982
The tower mass is 190.67 kg
The tower top deflection is 0.138 metres
The estimated natural frequency of the tower + turbine is 1.301 Hz
The estimated natural frequency of the 0.23*tower + turbine is 1.724 Hz
```

Metoda A u nastavku prikazuje proračun prirodne frekvencije, te procjenjuje krutost dijeljenjem ukupne horizontalne sile sa otklonom proračunatim iznad. Prirodna frekvencija može se izračunati kao korijen krutosti podijeljen sa težinom tornja.

Jednostavno je izračunati prirodnu frekvenciju sa konstantnim promjerom tornja bez turbine i njezinog potiska. Ova gruba metoda podcijeniti će najnižu prirodnu frekvenciju faktorom  $1/(0.56\pi) = 0.568$ . [12]

Koristeći ASCE uvjete izvijanja, dobiva se viši maksimalni faktor kapaciteta za razliku od faktora linearnog izvijanja pri analizi konačnih elemenata. Ovakva razlika je za očekivati budući da je prva tvrdnja bazirana na ispitivanjima stvarnih tornjeva osmerokutnih profila. Ukoliko se parcijalni faktor sigurnosti primjeni na  $T_{max}$ , maksimalni  $CF$  se povećava. Iz tablice 8 faktor sigurnosti opterećenja je 3.0, i iz tablice 9. faktor sigurnosti materijala je 1.1. Produkt ta dva faktora iznosi 3.3 što je blizu dvostrukog inverzije  $CF = 0.6$ . Stoga faktori proračuna se mogu inkorporirati u kod proračuna stupa, tako da se  $T_{max}$  podupla na 2100  $N$ . Međutim sa povećanim potiskom, povećava se i maksimalni faktor kapaciteta za izvijanje i naprezanje, te stup ne bi bio siguran. Holmes daje približnu jednadžbu, za najnižu prirodnu frekvenciju okruglog skošenog tornja promjenjive debljine je [12]

$$n_1 = \frac{\lambda}{2\pi h^2} \left( \frac{EI_h}{\rho_t A_h} \right)^{1/2} \quad (8.18.)$$

Gdje je

$$\lambda = 1.9 \exp(-4d_0/d_h) + 6.65 [0.9 + (t_0/t_h)^{2/3}]^{-1} \quad (8.19.)$$

Koji se reducira na formulu za neskošene stupove konstantne debljine

$$n_1 = \frac{0.56}{h^{3/2}} \left( \frac{EI_h}{m_t} \right)^{1/2} \quad (8.20.)$$

Kada je  $t_0 = t_h$  i  $d_0 = d_h$ . Usporedba sa rezultatom konačnih elemenata potvrđuje da je procjena relativno precizna za toranj osmerokutnog profila. Ponovno se naglašava, da je potrebno provesti analizu konačnih elemenata kako bi se precizno odredile prirodne frekvencije, i da metode procjene su korištene ovdje upravo za procjenu. Jedna važna upotreba ovog proračuna je za utvrditi kolika je vjerojatnost pojave rezonance uzrokovane lopaticama čija frekvencija se podudara sa najnižom prirodnom frekvencijom. Postoji visoka vjerojatnost da će turbina pobuditi prirodnu frekvenciju tornja tijekom rada, međutim potisak turbine pri 1  $Hz$  je nizak, stoga prikladno kruti

toranj ne bi trebao imati značajnu rezonancu. Također lopatice će biti stacionarne kada dođe do maksimalnog potiska pod slučajem opterećenja H standarda IEC 61400-2. [12]

Prirodna frekvencija je također nužna da bi se odredila potreba statička ili dinamičke analize. Primjerice AS1170.2 [20] , dopušta statičku analizu za konstrukcije sa  $n_1 > 1 \text{ Hz}$ , ali zahtijeva modificiranu analizu za niže vrijednosti koristeći povećana opterećenja vjetra, što često podrazumijeva ukrućivanje tornja. [12]

Sljedeće, potrebno je proračunati zamorno opterećenje na toranj, koje se može javiti it slučaja opterećenja A – pri normalnom radu. U prethodnom poglavlju izračunato je da

$$F_{x\text{-vratilo}} = 326 \text{ N}$$

I budući da slučaj opterećenja A uzima u obzir cikličko naprezanje između 50% i 150% proračunske brzine. Ako je prosječni potisak 326 N, maksimalni potisak je 489 N, te izračunati moment vratila naspram prvog ležaja turbine iznosi 132.8 Nm i pretpostaviti će se da taj moment  $M_0$  djeluje na toranj ciklički. U nastavku prikazan je proračun naprezanja dobiven maksimalnim i srednjim cikličkim opterećenjem za slučaj opterećenja A (linije sa debljinom stijenke i prirodnom frekvencijom su uklonjene) [12]

```
test(150, 0.15, 0.35, 3, 11, 489, 8.53, 132.8)
The horizontal force on tower is 0.17 kN
The base overturning moment is 6.31 kNm
The maximum CF for buckling is is 0.1908
The maximum CF for stress is 0.0704
```

```
test(150, 0.15, 0.35, 3, 11, 326, 8.53, 132.8)
The horizontal force on tower is 0.17 kN
The base overturning moment is 4.52 kNm
The maximum CF for buckling is is 0.1368
The maximum CF for stress is 0.0505
```

Kako bi se proračun slučajeve završio, potrebno je još izračunati naprezanje u tornju za slučaj opterećenja B sa žiroskopskim momentom od 325.3 Nm [12]

```
test(150, 0.15, 0.35, 3, 11, 326, 8.53, 325.3)
The horizontal force on tower is 0.17 kN
The base overturning moment is 4.71 kNm
The maximum CF for buckling is is 0.1455
The maximum CF for stress is 0.0537
```

Jednom kada se ukupna geometrija tornja odredi, potrebno je uzeti u obzir detalje kao što je pristupni otvor, spoj tornja i turbine, te tornja i temelja. Kao što je za očekivati, dno stupa i pristupni otvor su najkritičniji detalji. [12]

## 9. ELEKTRIČNI SUSTAV

Većina ranijih malih vjetroagregata koristile su istosmjerne generatore. Moderna praksa preferira trofazne izmjenične generatora sa permanentnim magnetima, uz indukcione generatore. Skoro svi moderni generatori su trofazni iz razloga što se time podiže omjer snage i mase i moment na vratilu je konzistentniji u odnosu na manje faza. Za male vjetroagregate uobičajeno je ispravljanje promjenjive frekvencije i snagu generatora napona, te pretvoriti je u istosmjernu struju konstantnog napona i frekvencije. Ovo je postalo moguće zbog značajno smanjenih troškova i povećanog kapaciteta modernih invertera. Inače ova pretvorba se kombinira sa praćenjem točke maksimalne snage koji ima za cilj upariti izlaznu snagu generatora sa karakteristikom lopatica, kako bi se dobila maksimalna moguća snaga iz vjetra kojem brzina naizgled nasumično varira. Praćenje točke maksimalne snage postaje standard na vjetroagregatima iznad mikro kategorije. Mnogi mikro vjetroagregati mijenjaju baterije i koriste mnogo jednostavniji sustav kontrole. Još jedan svježiji način kontrole je kombiniranje kontrolera i invertera za spajanje na mrežu. [12]

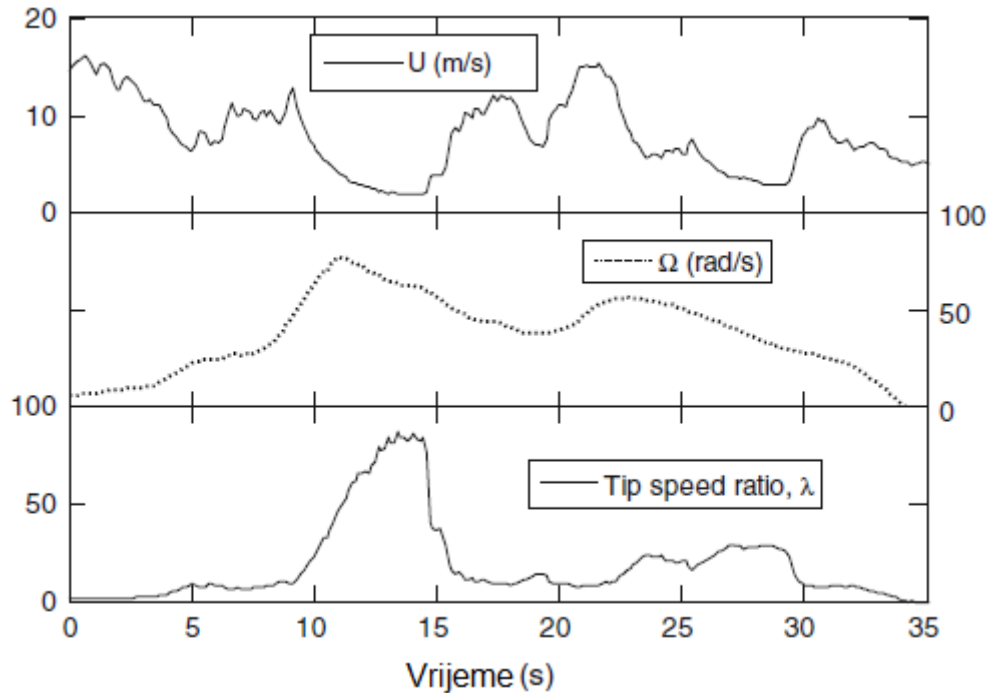
Filtriranje se često koristi kako bi se smanjila harmonijska distorzija snage isporučene prema mreži. Inverter također mora kontrolirati faktor snage, i nadgledati sigurno gašenje vjetroagregata ukoliko se mreža „izgubi“. Dodatno se izlaz vjetroagregata mora sinkronizirati sa mrežom. [12]

Također u današnje vrijeme postaje uobičajeno da kontroler vjetroagregata ima važnu ulogu pri zaštiti vjetroturbine od visokih brzina vjetra. Primjerice, neke vjetroturbine koriste spajanje generatora sa permanentnim magnetima u kratki spoj kako bi se spriječilo prebrzo okretanje rotora, umjesto drugih metoda kočenja poput skretanja, i mijenjanja kuta napada lopatica. Kao što je sa svim mehanizmima kočenja, postoje potencijalni problemi sa spajanjem izlaza u kratki spoj. Generirana struja i toplina mogli bi uzrokovati da magneti izgube svoja svojstva magnetičnosti ili spaliti namotaje.

Potreba za kontrolu visokih okretaja je povezana sa skoro-kubnom ovisnosti snage o brzini vjetra. Brzine vjetra samo neznatno više od nazivne brzine mogli bi uzrokovati nesigurne razine naprezanja na lopaticama i snage generatora. Slika 32. prikazuje grafički primjer postizanja visokih okretaja vjetroagregata snage 5 kW koja ima za nazivnu brzinu vjetra 10.5 m/s i disk kočnicu. Prije nego li je sustav kočenja bio završen, izvršeni su testovi kočenja sa odspojenim kontrolerom i nepobuđenim



generatorom. U početku lopatice su ubrzavale iz mirovanja do nazivne brzine okretaja, te je tada bilo planirano primijeniti kočnicu. Međutim zbog ljudske greške kočnica nije primijenjena kada je to bilo planirano na 8 s. Do 11 s lopatice su postigle brzinu od 730 *o/min* , tada je bilo potrebno kočnici 23 s da bi zaustavila lopatice. [12]

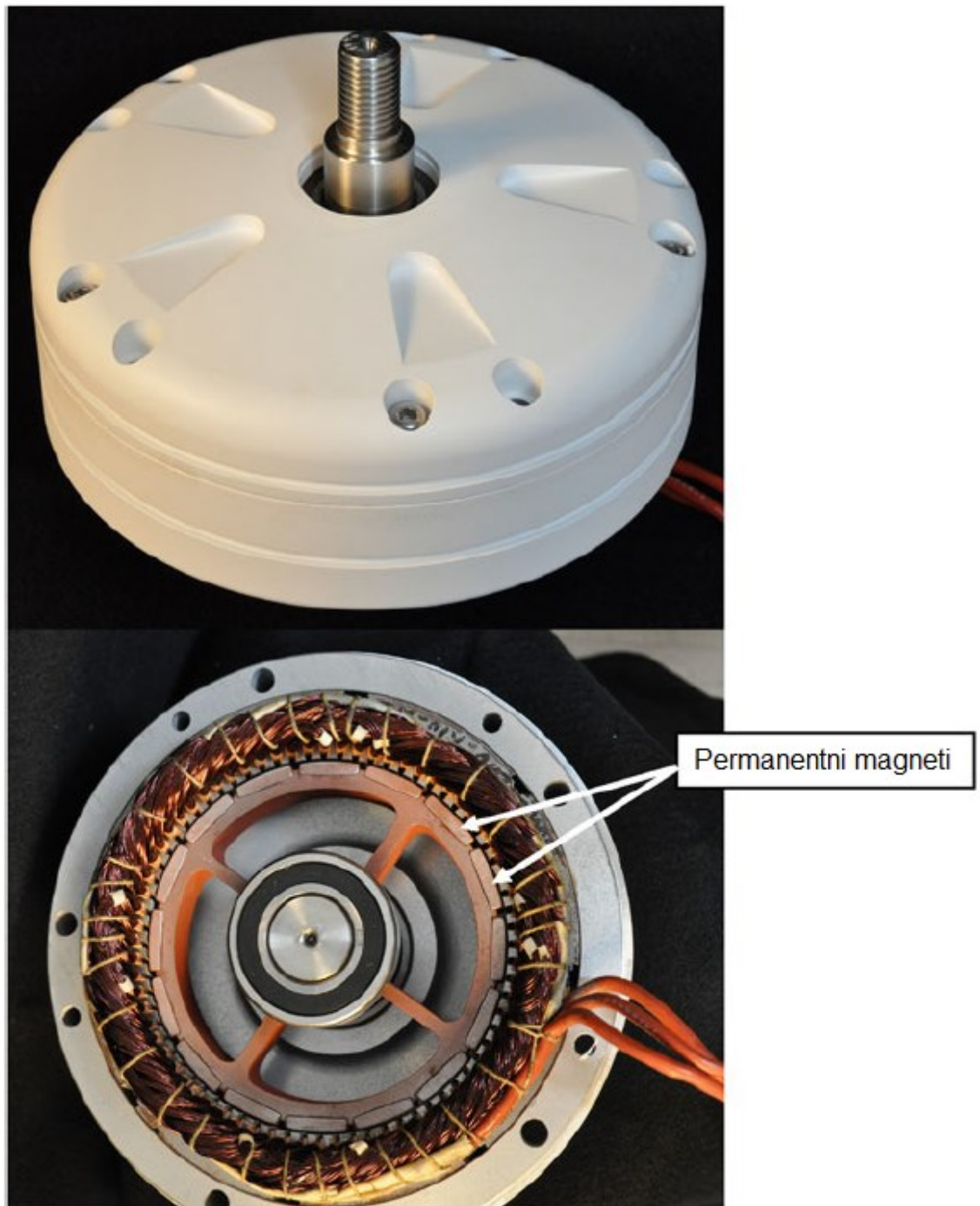


Slika 32. Prekomjerno ubrzavanje Aerogenesis 5kW vjetroturbine

## 9.1. Generatori za male turbine

Unatoč propasti istosmjernih generatora, vrijedno je ukratko ih spomenuti. Istosmjerni generatori su jednostavni za kontroliranje strujom polja, a oni manjih snaga su jeftini. Čak i prijenosna električna bušilica može se napraviti da radi kao istosmjerni generator, ali takvi generatori imaju četkice i komutator. Budući da istosmjerni generatori koriste struju polja kako bi dobili magnetsko polje, imaju više gubitaka od dobro proračunatog generatora sa permanentnim magnetima, i općenito su manje učinkoviti. Slika 33 prikazuje jednostavnu strukturu generatora sa permanentnim magnetima, u ovom slučaju Ginlong 500-A. Osim jednostavne strukture, generatora sa permanentnim magnetima sa više polova, u ovom slučaju 16, rade sa visokom učinkovitošću pri niskim okretajima, što obično znači da nije potrebno povećavanje broja okretaja. Permanentni magneti su pozicionirani na rotor koji rotira unutar statora na kojem su namotaji. Potrebno je zamijetiti da određeni rijetki magneti (pr. NeFeB) mogu se zapaliti ukoliko se potroši zaštitni premaz. Određeni generatori sa permanentnim magnetima mogu

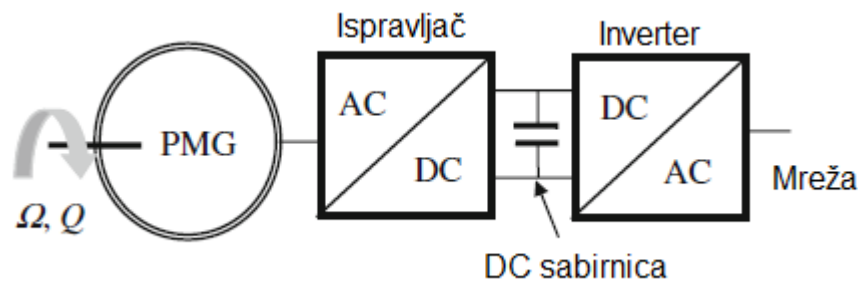
imati premaz od staklo plastike ili željeza kako se magneti ne bi pomakli. [12]



Slika 333. Pogled izvana i iznutra generatora sa permanentnim magnetima

Maksimalna učinkovitost generatora obično se javlja na najvećem naponu (nazivna brzina ili više), jer za istu izlaznu snagu, struja generatora je niža. Gubici provodljivosti se povećavaju sa povećanjem generatorske struje što se više griju vodiči. Postoje gubici zbog željeza u generatoru, jer se željezni materijal više puta u rotaciji magnetizira i demagnetizira. Takvi gubici ovise o snazi magnetnog polja i brzini

okretaja generatora. [12] U ovom projektu za odabran je generator sa permanentnim magnetima čiji osnovni podaci su dani u tablici 11. Ostali podaci dani su u prilogu ovog rada.



Slika 34 Shema generatora priključenog na mrežu

Tablica 11. Osnovni podaci izabranog generatora

Vrsta generatora	Generator s permanentnim magnetima bez jezgre
Rotor	Neodimijski magnet (NdFeB)
Nazivna snaga	2 kW
Nazivna brzina okretaja	350 o/min
Nazivni napon	48 V 3 faze
Nazivna jakost struje	24.1 kW
Broj polova	28
Početni moment	< 1 Nm
Nazivni moment	61 Nm
Učinkovitost	90%
Frekvencija	82 Hz

Generator sa permanentnim magnetima u radu na konstantnim okretajima proizvodi maksimalnu snagu kada se impedancija opterećenja uskladi sa onom od generatora. Ovo stanje može se postići dodavanjem kapaciteta, ali potrebna količina je ovisna o brzini okretaja generatora, te maksimalni prijenos snage dolazi sa cijenom visokog smanjenja učinkovitosti. Za topologiju ispravljač-kontroler-inverter prikazanu na slici 34, usklađivanje se može izvesti modulacijom širine impulsa. [12]

Generator sa permanentnim magnetima proizvodi trofaznu snagu, promjenjivog napona i frekvencije koja se obično ispravlja u istosmjernu struju. Ukoliko vjetroturbina puni baterije, tada bi se one zamijenile sa inverterom na shemi. [12]

## 10. ZAKLJUČAK

Iz ovog rada može se zaključiti da je uspješno proračunat vjetroagregat za potrebe polovice godišnjeg troška jednog kućanstva. Za potrebe proračuna uzeta je prosječna brzina vjetra pronađena na različitim izvorima, međutim potrebno je zamijetiti da energija vjetra ovisi o kubu srednje brzine vjetra, što znači da mala promjena u brzini vjetra može činiti veliku razliku pri projektiranju, i to je uzeto u obzir prilikom proračuna. Također ovisnost energije vjetra o brzini vjetra je ključna pri određivanju pozicije vjetroagregata, što je teško procijeniti iz klasičnih izvora, već potrebno je na potencijalnoj poziciji montaže izmjeriti brzinu i smjer vjetra prije montaže odabirom jednog od navedenih instrumenata definiranih

U ovom slučaju brzina vjetra je poprilično niska za današnje standarde srednjih nazivnih brzina vjetra, što je učinilo rotor vjetroagregata većim s obzirom na proračunatu snagu, u usporedbi sa tipskim rotorima koji su namijenjeni za nazivnu snagu od  $10 \text{ m/s}$ .

Iz proračuna može se zaključiti da vjetroagregat zadovoljava pri opterećenju na zamor i ostale slučajeve naprezanja prema standardu IEC 61400-2, od kojih najveće opterećenje proizlazi iz slučaja opterećenja B, gdje vjetroagregat skreće pri radu zbog promjene smjera vjetra ili tijekom kočenja skretanjem. Također može se zaključiti da ova analitička metoda proračuna vjetroagregata nije precizna kao ostale moderne metode, ali je najjeftinija od ostalih ne uzimajući u obzir da korištenjem ove metode dobiva se veći faktor sigurnosti, koji dodatno opterećuje budžet projekta.

## 11. LITERATURA

1. Fortunato B. i G. Mummolo i G. Cavallera, *Economic optimization of wind power plants for isolated locations* (1997). Solar Energy 60(6)
2. Mathew S., *Wind energy Fundamentals, resource analysis and economics* Njemačka, 2006.,
3. Ž. Đurišić, *Vjetroelektrane 1 dio*, Beograd 2015.
4. <https://hr.wikipedia.org/wiki/Vjetar> Pristupljeno:07.02.2023
5. Nelson, V., *Wind Energy: Renewable Energy and the Environment.*, CRC Press, 2009.
6. Mathew S i K.P. Pandey i K.V. Anil *Analysis of wind regimes for energy estimation*, Renewable Energy, 2002.
7. Machias A.V., G.D. Skikos, *Fuzzy risk index for wind sites.*, IEEE Transactions on Energy Conversion 7(4) 1992.
8. Drachmann, A.G., *Heron's windmill*, Centaurus, 1961.
9. W. Tong *Fundamentals of wind energy*, WIT Transactions on State-of-the-art in Science and Engineering, 2010.
10. S.J. Strong, *Design of a Small Wind Turbine*, University of Queensland, 2008.
11. Coppin P. i K. Ayotte i N. Steggel, *Wind Resource Assessment in Australia: A Planner's Guide*, CSIRO Wind Energy Research Unit, Australia, 2003.
12. D. Wood *Small wind turbines - analysis design and application*, Springer 2011.
13. Ž. Đurišić, *Vjetroelektrane 2. dio*, Beograd 2015.
14. L. Staudt, *Design and development of small wind turbines*, Tong, W.( ur.), *Wind Power Generation and Wind Turbine Design*, Center for renewable energy, Dundalk Institute of Technology, WIT Press, Ireland,
15. Mandell J.F., et al. *New fatigue data for wind turbine blade materials.*, ASME wind energy symposium, Nevada SAD, 2003,
16. Ragheb A i Ragheb M. *Wind turbine gearbox technologies.*, *Proceedings of the 1st international nuclear and renewable energy conference (INREC10)*, Amman, 2010.
17. <https://map.neweuropeanwindatlas.eu/> Pristupljeno: 24.07.2022
18. <https://meteo.hr>-DHMZ - Državni hidrometeorološki zavod Pristupljeno: 8.12.2022
19. Manwell JF i J.G. MCGowan i A.L. Rogers, *Wind energy explained—theory, design and application*, New York 2002.
20. AS 1170.2, *Australian standard AS 1170.2:2002 structural design actions—wind*

*actions* 2002.

21. Clifton-Smith M, D.H. Wood, *Optimisation of self-supporting small wind turbine towers*. Wind Eng, 2010.

22. [https://en.wikipedia.org/wiki/Wind\\_power\\_by\\_country](https://en.wikipedia.org/wiki/Wind_power_by_country) Pristupljeno: 1.9.2023

23. A. D. Hansen *Wind Turbine Technologies*, T. M. Letcher, (ur.) *Wind Energy Engineering, 2017.*, Elsevier

## 12. PRILOZI

### 12.1. Popis slika

Slika 1. Drevna vjetrenjača na Britanskom otočju.....	4
Slika 2 Kut upada Sunčevih zraka na Zemljinu površinu .....	6
Slika 3. Posljedica djelovanja Coriolisove sile .....	7
Slika 4. Lokalni vjetrovi .....	7
Slika 5. Promjena brzine vjetra u odnosu na visinu .....	8
Slika 6. Ovisnost brzine ovisno o visini hrapavosti terena .....	10
Slika 7 Weibull-ova distribucija za različite srednje vrijednosti brzine vjetra .....	11
Slika 8 Utjecaj prepreke na turbulencije .....	11
Slika 9 Efekt ubrzanja vjetra preko brda .....	12
Slika 10 Variranje brzine vjetra u ovisnosti sa vremenom .....	13
Slika 11 Klonulost drveća kao vizualni indikator brzine vjetra.....	15
Slika 12 Griggs- Putnamov index deformacije .....	15
Slika 13. Cup anemometar postavljen na nosaču.....	16
Slika 14 Propelerni anemometar za mjerenje vertikalne komponente brzine vjetra..	17
Slika 15 Ultrazvučni anemometar .....	17
Slika 16 Shematski prikaz principa rada laser-doppler (LIDAR) sustava.....	18
Slika 17. Pokazivač smjera vjetra .....	19
Slika 18 Grafički prikaz ruže vjetrova, A-ružica frekvencija, B- ruža brzina vjetra, C- ruža snage.....	22
Slika 19. Diskretni histogram brzina vjetra.....	23
Slika 20 Normalizirani diskretni histogram brzina vjetra .....	24
Slika 21. Uređeni godišnji dijagram kumulativnog trajanja brzina vjetra na različitim visinama .....	24
Slika 22 Elementarni volumen koji prolazi disk rotora.....	25
Slika 23 Graf krivulje vjetroturbine .....	29
Slika 24. Različiti tipovi vjetroturbina sa vertikalnom osovinom a) Darriusova vjetroturbina; b) Savoniusova vjetroturbina; c) H vjetroturbina .....	30
Slika 25. Različiti tipovi vjetroturbina velikih snaga sa horizontalnom osovinom: a) vjetroturbine sa jednom lopaticom i utegom; b) vjetroturbina sa dvije lopatice; c) vjetroturbina sa tri lopatice.....	31

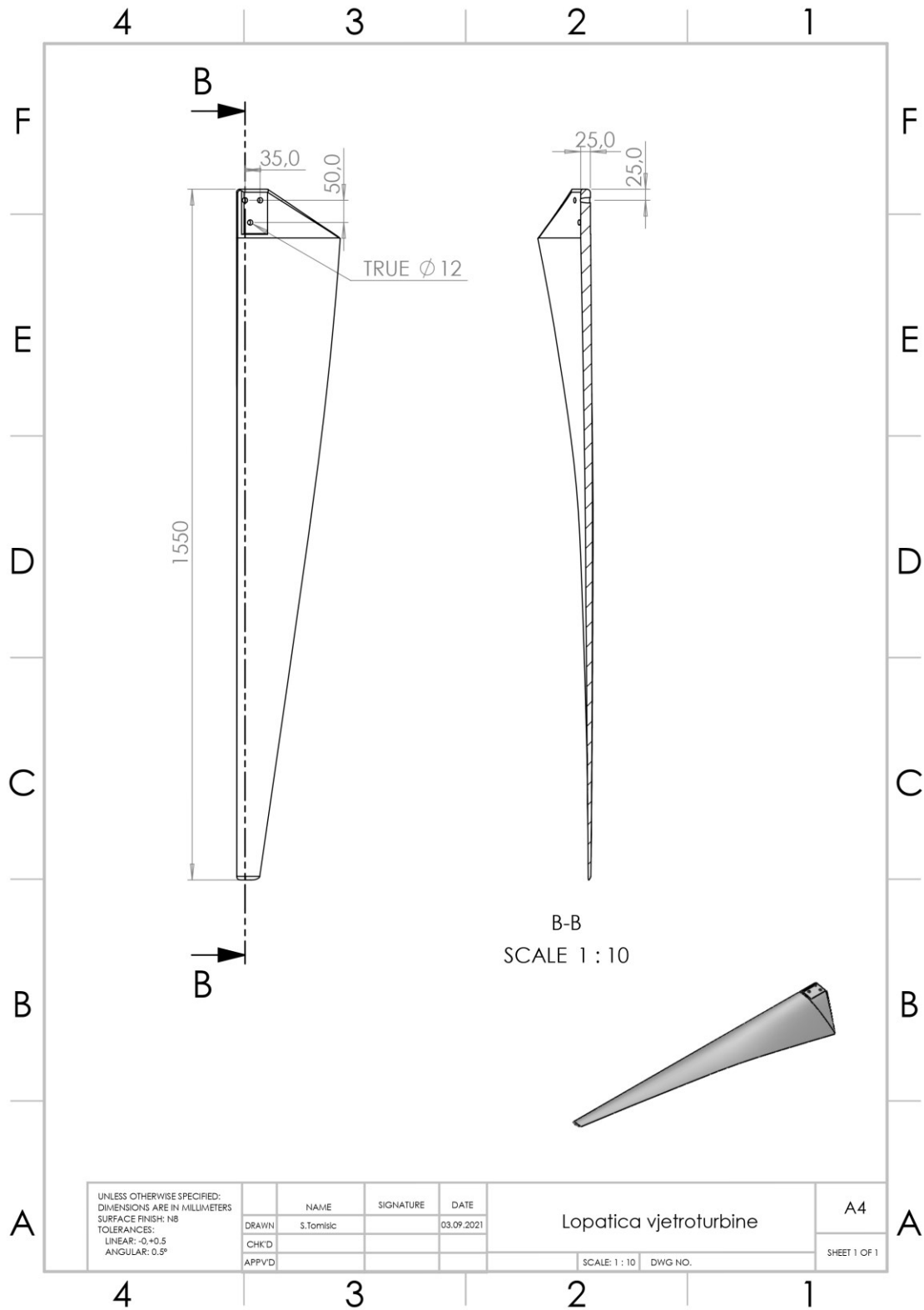
Slika 26 Funkcionalni sklop modernog vjetroagregata .....	32
Slika 27. Rešetkasti toranj .....	33
Slika 28. Čelični stup .....	34
Slika 29. Aeroprofil lopatice .....	35
Slika 30. Aeroprofil označeni prema NACA standardu .....	35
Slika 31 Brzina vjetra na 10 metara .....	37
Slika 32. Prekomjerno ubrzavanje Aerogenesis 5kW vjetroturbine .....	63
Slika 33. Pogled izvana i iznutra generatora sa permanentnim magnetima .....	64
Slika 34 Shema generatora priključenog na mrežu .....	65

## **12.2. Popis tablica**

Tablica 1. Ovisnosti dužine hrapavosti o terenu. ....	38
Tablica 2 Razlike u označavanju u odnosu na IEC 61400-2 .....	41
Tablica 3 IEC klase vjetroturbine .....	41
Tablica 4. Slučajevi opterećenja jednostavnog modela opterećenja .....	42
Tablica 5 Popis indeksa i kordinata .....	43
Tablica 6. Koeficijent sile za slučaj naprezanja H iz IEC 61400-2 .....	48
Tablica 7. Formule nazivnog naprezanja iz IEC 61400-2 .....	49
Tablica 8. parcijalni faktor sigurnosti za SLM opterećenja .....	49
Tablica 9. Parcijalni faktor sigurnosti materijala .....	50
Tablica 10. Parametri za skošeni stup osmerokutnog poprečnog presjeka .....	59
Tablica 11. Osnovni podaci izabranog generatora .....	65



### 12.3. Slike modelirane lopatice



## 12.4. Podaci o generatoru



PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS GENERATOR	
SPECIFICATION SHEET	
Generator Technical Parameters	
Model	BLSK-380 (2kW 350RPM 48Vac)
Generator Type	Coreless disc axial flux permanent magnet generator
Generator Rotor	Neodymium NdFeB Magnet Steel
Rated Power	2 kW
Rated RPM	350 RPM
Rated Voltage	48 Volts 3 Phase AC
Rated Current	24.1 A
Frequency	82 Hz
Number of poles	28
Start Torque	<1 Nm
Rated Torque(Full load)	61 Nm
Efficiency	90%
Voltage Phase Type	3 Phase
Power Factor	= 1
Temperature Rise	90°C
Magnet withstand max temperature	130°C
Copper Wire withstand max temperature	180°C
Protection degree	IP54
Generator Disc Diameter	380mm
Shaft Diameter	50mm
Generator height	255mm
Shell Material	Aluminum alloy
Winding Material	100% Copper Wire
Shaft Material	Carbon Steel
Magnet Material	NdFeB 42UH
Bearing Brand	NSK
Installation Type	Outer Rotor
Net Weight/Packaging Dimension	38kg/430mm×430mm×360mm
Design Lifetime	20 Years

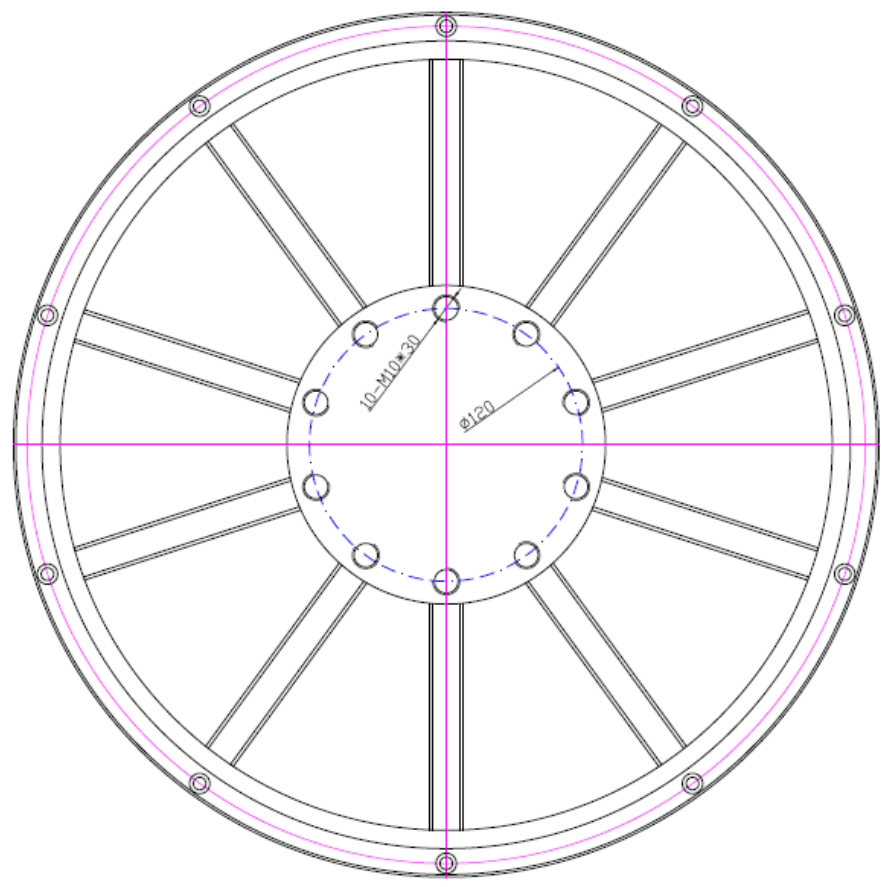
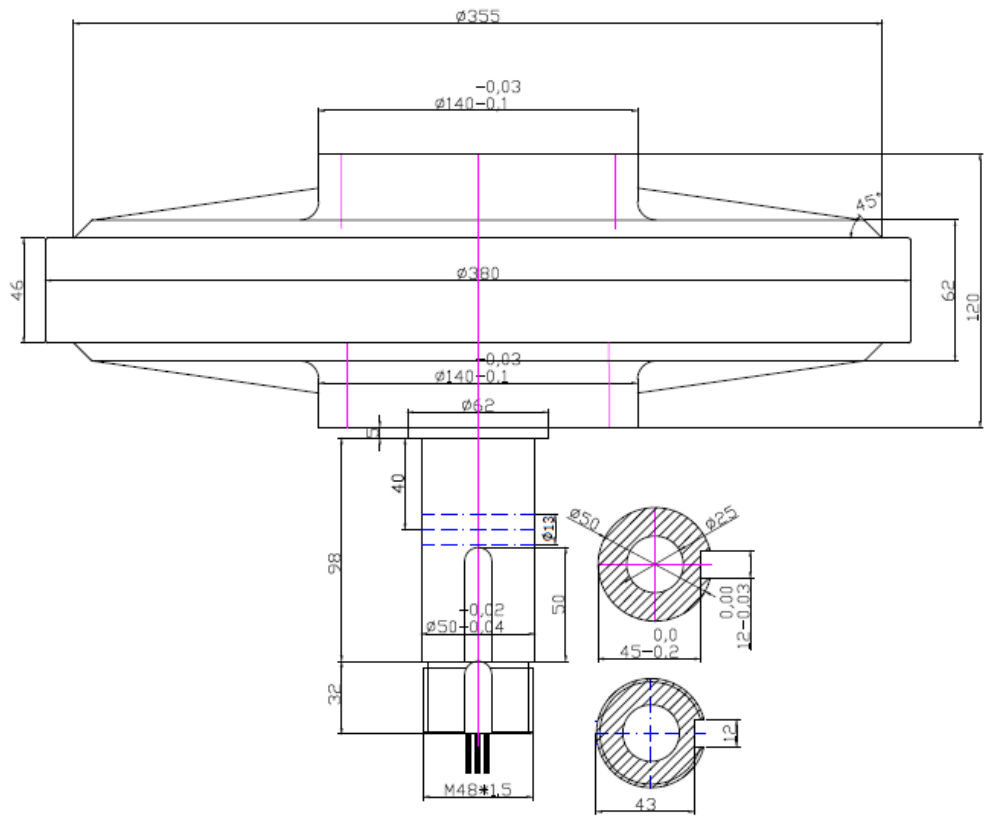
CE

**Product Features**

1. Patented torque technology: The latest "precision coil" technology is used. Hysteresis-free and gear-notch effect makes starting torque very low <1Nm.
2. Original structure: The use of a disc-type hollow cup motor instead of a conventional generator, making it lighter in size.
3. Higher utilisation: special hollow cup generator technology is used to eliminate bottlenecks in the use of low-speed wind energy.
4. Higher reliability: the special structure allows for a greater power to volume ratio and power to weight ratio and a life span 8 times longer than conventional generators.
5. Gearless, direct-drive, low-speed generator
6. High-standard, high-quality components for use in the harsh and extreme environments of wind turbines.
7. High efficiency and low mechanical resistance energy loss.
8. Aluminum alloy outer frame and special internal structure for good heat dissipation.

**Photos of product**



# Power-RPM-Voltage-Frequency Curve



NO.	Model	Speed(rpm)	Power(KW)	Voltage (V)	Frequency(Hz)	Torque(N-m)
1		0	0.00	0.0	0	<1
2		35	0.20	4.8	8	6.1
3		70	0.34	9.1	16	12.2
4		105	0.50	13.9	25	18.3
5	<b>BLSK-380 2kW</b>	140	0.68	18.7	33	24.4
6	<b>350RPM</b>	175	0.84	24.0	41	30.5
7		210	1.04	28.3	49	36.6
8		245	1.24	32.6	57	42.7
9		280	1.50	37.4	66	48.8
10		315	1.72	42.7	74	54.9
11	<b>Rated</b>	<b>350</b>	<b>2.00</b>	<b>48.0</b>	<b>82</b>	<b>61.0</b>
12		385	2.30	55.2	90	67.1
13		420	2.60	61.4	98	73.2

