

Dizajn i regulacija vjetroturbina

Baklaić, Andrea

Master's thesis / Diplomski rad

2025

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:168:664766>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-14**



Repository / Repozitorij:

[FER Repository - University of Zagreb Faculty of Electrical Engineering and Computing repository](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 171

DIZAJN I REGULACIJA VJETROTURBINA

Andrea Baklaić

Zagreb, veljača 2025.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 171

DIZAJN I REGULACIJA VJETROTURBINA

Andrea Baklaić

Zagreb, veljača 2025.

DIPLOMSKI ZADATAK br. 171

Pristupnica: **Andrea Baklaić (0036502065)**
Studij: Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Profil: Elektroenergetika
Mentor: izv. prof. dr. sc. Siniša Šadek

Zadatak: **Dizajn i regulacija vjetroturbina**

Opis zadatka:

Vjetroturbine su izložene direktnom strujanju zraka i zbog toga je potreban specifičan dizajn kako bi se preuzela što veća snaga vjetra, uz što manje mehaničke gubitke. Snaga turbine je složena funkcija brzine vjetra i potrebno je numeričko modeliranje kako bi se utvrdila veza između ovih dviju veličina. Za početak je potrebno pripremiti podatke o brzini vjetra za danu lokaciju, te odrediti matematičku razdiobu brzina i izračunati srednju brzinu vjetra za pretpostavljeni interval brzina. Nakon toga treba izračunati polumjer radnog kola i kutnu brzinu turbine, te odabrati profil lopatice, odnosno izračunati koeficijente otpora i uzgona u ovisnosti o napadnom kutu lopatice. Nadalje treba odrediti aksijalne i radijalne inducirane faktore. Na kraju se određuje kut zakreta lopatice i vrsta profila, odnosno duljina i širina lopatice. Vaš je zadatak najprije teorijski opisati proces dizajna vjetroturbine, i opisati načine regulacije snage vjetroagregata. Nakon toga je potrebno pripremiti numerički model vjetroturbine korištenjem programa MATLAB koji će omogućiti izračun snage vjetroturbine u ovisnosti o ulaznom profilu brzine vjetra.

Rok za predaju rada: 14. veljače 2025.

Mojoj obitelji, prijateljima i Lini.

Sadržaj

Uvod	1
1. Energija vjetra.....	2
1.1. Matematički model gibanja vjetra	2
1.2. Teoretski maksimum iskoristive snage vjetra	3
1.2.1. Betzov limit	4
1.3. Koeficijent snage C_p	5
1.4. Utjecaj gustoće zraka.....	6
1.5. Statistička obrada brzina vjetra	7
1.5.1. Weibullova funkcija gustoće stanja.....	7
2. Aerodinamički profil lopatice.....	10
2.1. Različiti aeroprofili.....	13
2.1.1. NACA 4412.....	14
2.2. DU serija.....	15
3. Vjetroelektrana	16
3.1. Vjetroturbina.....	17
3.1.1. Vjetroturbine s horizontalnom osi vrtnje (HAWT)	18
3.1.2. Vjetroturbine s vertikalnom osi vrtnje (VAWT)	19
3.2. Konstrukcija vjetroturbina	20
4. Snaga turbine	21
4.1. Regulacija snage vjetroturbine	22
4.2. Stalna regulacija snage	23
4.3. Aktivna regulacija snage	23
4.4. Pasivna regulacija snage.....	23
4.5. Mehanička regulacija snage.....	24

4.6.	Metode regulacije snage	25
4.6.1.	Upravljanje zakretanjem lopatica	25
4.6.2.	Regulacija gubitka uzgona.....	25
4.6.3.	Aktivna regulacija gubitka uzgona	25
4.6.4.	Sustav zakretanja gondole	26
4.6.5.	Elektronička regulacija snage.....	26
5.	Teoretska podloga rada vjetroturbine	27
6.	Optimalne dimenzije lopatice	32
6.1.	Srednja energetska brzina.....	32
6.2.	Optimalne dimenzije lopatica.....	35
6.2.1.	Ulazni podaci.....	35
6.2.2.	Računanje polumjera lopatice	37
6.2.3.	Računanje brzohodnosti	38
6.2.4.	Rezultati i izbor turbine	38
6.3.	Izbor profila lopatice	39
6.3.1.	Indukcijski faktori	41
6.4.	Izračunavanje optimalnog kuta lopatice	44
6.5.	Dimenzioniranje širine lopatice.....	45
6.5.1.	Kut uvijenosti ϕ	46
6.6.	Snaga turbine	47
	Zaključak	49
	Literatura	50
	Sažetak.....	51
	Summary.....	52

Uvod

Vjetroelektrane su jedan od najvažnijih izvora obnovljive energije s velikim potencijalom za budućnost. Napredak tehnologije poboljšava učinkovitost vjetroturbina, smanjuje troškove i omogućava širu primjenu kako na kopnu, tako i na moru. S obzirom na klimatske promjene i potrebu za održivim izvorima energije, vjetroelektrane će igrati ključnu ulogu u budućnosti globalne energetike. No, njihova ovisnost o vremenskim uvjetima odnosno brzini vjetra čini projektiranje vjetroturbine složenim procesom.

Zadatak ovog diplomskog rada je napisati numerički model optimalnih dimenzija vjetroturbine korištenjem programa MATLAB. Konstrukcijski oblik vjetroturbina razlikuje se prema djelovanju sila na lopatice, položaju vratila i samom broju lopatica te na dizajn utječe varijabilna proizvodnja električne energije zbog različite brzine strujanja zraka koja će se pretpostaviti Weibullovom distribucijom brzine vjetra za lokaciju postavljanja vjetroturbine.

Dizajn i konstrukcija vjetroturbina određuju njihovu učinkovitost, dugovječnost i ekonomsku isplativost. Uzimaju se u obzir aerodinamički, strukturni i električni aspekti kako bi se optimizirala proizvodnja energije i smanjili gubici. Za dimenzioniranje vjetroturbine i računanje optimalne dimenzije lopatica potrebno je poznavati teoretsku podlogu strujanja zraka te djelovanja pokretnih sila na vjetroturbinu.

Cilj numeričkog modela je osigurati ravnomjernu raspodjelu opterećenja i optimalnu aerodinamičku iskoristivost duž cijele dužine lopatice. Računaju se srednja energetska brzine vjetra, polumjer rotora i koeficijent brzohodnosti prema kojima se bira vrsta vjetroturbine. Pravilnim odabirom optimalnog narinutog kuta smanjuju se utjecaji sila uzgona i otpora te se postiže maksimalna aerodinamična učinkovitost profila lopatice vjetroturbine. Složenim algoritmom izbora profila lopatice računaju se induksijski faktori koji su ključni za određivanje optimalnog kuta.

1. Energija vjetra

Energija vjetra je jedan oblik sunčeve energije, a podrazumijeva kretanje zraka uz Zemljinu površinu od područja visokog tlaka prema područjima niskog tlaka. Sunce nejednako zagrijava površinu Zemlje, a nejednako zagrijavanje ovisi o kutu upada Sunčevih zraka i o pokrivenosti površine vegetacijom ili vodenom masom. Time se oceani i mora sporije zagrijavaju i hlade, nego kopno. Toplina koju apsorbira površina Zemlje prenosi se na tlak iznad površine, pošto je topliji zrak rjeđi od hladnijeg, on se podiže iznad hladnog zraka što stvara razliku tlaka između pojedinih slojeva.

Postoje dva glavna razloga rotiranja lopatice vjetroturbine pri strujanju vjetra, a to su treći Newtonov zakon i Bernoulijev efekt. Treći Newtonov zakon kaže da svaka sila akcije uzrokuje silu reakcije, jednakog iznosa, ali suprotnog smjera djelovanja. U slučaju vjetroturbina, vjetar gura zrak na lopatice vjetroturbine i uzrokuje otklonjenost lopatica od odbijenog vjetra.

1.1. Matematički model gibanja vjetra

Energija vjetra je energija mase zraka u pokretu što predstavlja kinetičku energiju E_k .

$$E_k = \frac{m \cdot v^2}{2} \quad (1.1)$$

Masu zraka određuje gustoća zraka, površina kroz koju struji, brzina i vrijeme. U tom slučaju prethodna jednadžba (1.1) prelazi u:

$$E_k = \frac{A \cdot x \cdot \rho \cdot v^2}{2} \quad (1.2)$$

Snaga vjetra definira se kao rad izvršen u nekom vremenu, odnosno kao brzina prenošenja energije. Snaga vjetra može se izraziti kao:

$$P_w = \frac{E_k}{t} = \frac{1}{2} \frac{A \cdot x \cdot \rho \cdot v^2}{t} \quad (1.3)$$

Omjer x i t na desnoj strani jednadžbe (1.3) predstavlja brzinu vjetra pa prethodni izraz glasi:

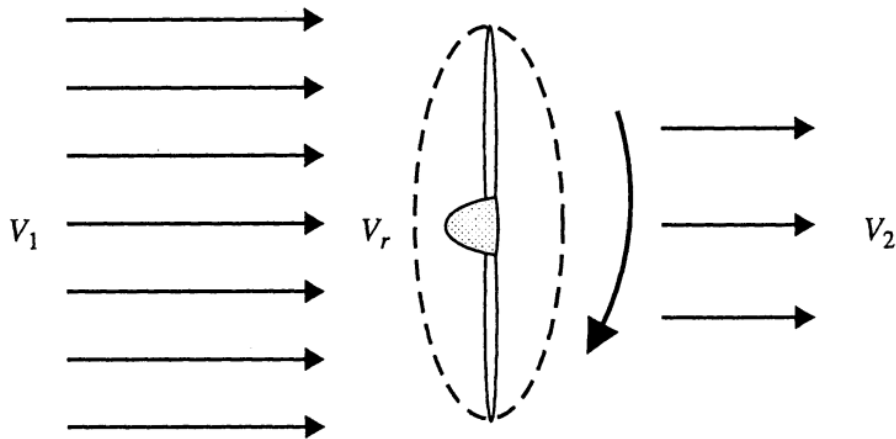
$$P_w = \frac{1}{2} \cdot A \cdot \rho \cdot v^3 \quad (1.4)$$

$$A = R^2\pi \quad (1.5)$$

gdje je A , površina koju zahvaćaju lopatice rotora pri okretanju, a R je polumjer lopatice. Snaga vjetra jednaka je trećoj potenciji brzine vjetra i proporcionalna je površini koju zahvaćaju lopatice vjetroturbine. Kod vjetroturbina s horizontalnom osi, površina je proporcionalna kvadratu radijusa, odnosno dužini lopatice.

1.2. Teoretski maksimum iskoristive snage vjetra

Od ukupne teoretske snage vjetra, samo je dio iskoristiv zbog gubitaka pretvorbe energije. Ako se narine strujanje glatkog i ravnomjernog zraka uz vjetar prosječne brzine V_1 na vjetroturbinu, dolazi do prijelaza dijela energije vjetra u rotor vjetroturbine tako da glatki i ravnomjerni zrak nastavi strujati niz vjetar smanjenom prosječnom brzinom V_2 kao što je prikazano na slici 1.1.



Slika 1.1. Strujanje zraka na rotor

Prethodno opisan proces može se prikazati jednadžbama:

$$E_k = E_{k_1} - E_{k_2} \quad (1.6)$$

$$E_k = \frac{1}{2}m(V_1^2 - V_2^2) \quad (1.7)$$

U procesu izvlačenja energije iz vjetra, brzina vjetra V_r pokreće rotor i ima manju vrijednost od brzine V_1 . U idealnoj vjetroturbini bez gubitaka, sva redukcija u strujanju zraka prenosi se na rotor vjetroturbine. Prosječna brzina V_2 niz vjetar tada je manja od brzine pokretanja rotora V_r .

$$V_1 > V_r > V_2 \quad (1.8)$$

1.2.1. Betzov limit

Betzov limit ili Betzov zakon postavio je njemački fizičar Albert Betz 1919. godine. Zasnovan je na principima aerodinamike i očuvanja mase i energije te definira maksimalnu teorijsku efikasnost vjetroturbine u pretvaranju kinetičke energije vjetra u mehaničku energiju.

Za strujanje zraka na lopaticama rotora vrijedi izraz za brzinu prenesene zračne mase m u vremenu t :

$$\frac{dm}{dt} = \rho A \frac{dx}{dt} = \rho A V_r \quad (1.9)$$

Snaga rotora tada je:

$$P_r = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} (V_1^2 - V_2^2) = \frac{1}{2} \rho A V_r (V_1^2 - V_2^2) \quad (1.10)$$

Sada masa zraka koja prolazi kroz rotor, prolazi ne samo smanjenje energije, nego i smanjenje linearnog momenta. Vremenski period smanjenja momenta je sila koja se prikazuje kao:

$$\frac{dm}{dt} (V_1 - V_2) = \rho A V_r (V_1 - V_2) \quad (1.11)$$

Izjednačavanjem jednadžbi dobiva se izraz za brzinu vjetra na rotoru:

$$V_r = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (1.12)$$

U idealnom modelu vjetroturbine brzina vjetra na rotoru je srednja vrijednost brzina V_1 i V_2 . Za iskoristivu snagu vjetra P_{ex} tada vrijedi:

$$P_{ex} = \frac{1}{2} \rho A \left(\frac{V_1 + V_2}{2} \right) (V_1^2 - V_2^2) = \frac{1}{4} \rho A (V_1 + V_2) (V_1^2 - V_2^2) \quad (1.13)$$

Daljnim množenjem dolazi se do izraza:

$$P_{ex} = \frac{1}{4} \rho A V_1^3 \left[1 + \frac{V_2}{V_1} - \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^2 - \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^3 \right] = \frac{1}{4} \rho A V_1^3 \left[1 + \frac{V_2}{V_1} \right] \left[1 - \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^2 \right] \quad (1.14)$$

Rješenje kvadratne jednadžbe prikazuje da je maksimalna iskoristiva snaga vjetra kada omjer V_2/V_1 iznosi 1/3 ili -1. Negativno rješenje se odbacuje i pravo rješenje je:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{3} \quad (1.15)$$

Maksimalna iskoristiva snaga u idealnim uvjetima glasi:

$$P_{ex}(max) = \frac{8}{27} \rho A V_1^3 = \left(\frac{16}{27} \right) \frac{1}{2} \rho A V_1^3 \quad (1.16)$$

$$P_{ex}(max) = (0,593) \cdot \frac{1}{2} \rho A V_1^3 \quad (1.17)$$

Teoretski maksimum prema Betzovoj formuli iznosi 16/27, odnosno 0,593 što se još naziva Betzovim limitom u literaturi, koji pokazuje da i u idealnim uvjetima iskoristiva snaga vjetra je 59.3% ukupne snage.

1.3. Koeficijent snage C_p

U prethodnom poglavlju prikazano je da snaga koja je iskoristiva iz vjetroturbine puno manja od maksimalne teoretske snage. Na vjetroturbinu utječe otpor zraka i trenje zraka na rotoru lopatica koji uzrokuju gubitke u obliku topline. Osim toga, rotacija lopatica uzrokuje vrtloženje zraka, koji smanjuje okretni moment koji se prenosi na lopatice. Prema teoriji njemačkog znanstvenika Alberta Betza iskoristiva snaga vjetra P_{ex} može se izraziti kao:

$$P_{ex} = C_p \frac{1}{2} \rho A V_1^3 \quad (1.18)$$

gdje V_1 brzina uz vjetar. Koeficijent snage vjetroturbine C_p mjeri koliko učinkovito turbina pretvara snagu vjetra u iskoristivu mehaničku snagu. Definiran je omjerom iskoristive snage vjetra P_{ex} i ukupne dostupne snage vjetra P_w te njegova formula glasi:

$$C_p = \frac{P_{ex}}{P_w} \quad (1.19)$$

$$C_p = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{V_2}{V_1} \right] \left[1 - \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^2 \right] \quad (1.20)$$

Prema Betzovom zakonu, maksimalna vrijednost koeficijenta snage C_p iznosi 0.593, dok vrijednost koeficijenta snage C_p novih generacija vjetroturbina varira između 0,32 i 0,52 ovisno o aerodinamičkom dizajnu lopatica, brzini vjetra, gubicima zbog vrtloženja zraka u učinkovitosti generatora.

1.4. Utjecaj gustoće zraka

Iz formule za izračun snage vjetra proizlazi da je osim brzine vjetra za proračun snage vjetra važna i gustoća zraka. Kao referentna gustoća zraka koristi se vrijednost od 1,225 kg/m³ koja vrijedi za temperaturu zraka od 15 °C i tlak od 1 atm (1013,25 hPa). Uz aproksimaciju zraka kao idealnog plina vrijedi i izraz:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (1.21)$$

pri čemu je p tlak zraka, V njegov volumen, n broj molova plina, R univerzalna plinska konstanta iznosa 8,314472 Jmol⁻¹K⁻¹, a T apsolutna temperatura. Za gustoću zraka vrijedi:

$$\rho = \frac{n \cdot M}{V} \quad (1.22)$$

gdje je M molarna masa. Kombinacijom prethodna dva izraza, gustoću zraka u konačnici glasi:

$$\rho = \frac{p \cdot M}{R \cdot T} \quad (1.23)$$

Gustoća zraka prema izrazu (1.23) ovisi o tlaku i temperaturi koji se oboje mijenjaju s nadmorskom visinom. Na višim nadmorskim visinama gustoća zraka se smanjuje zbog nižeg tlaka i temperature te pada na vrijednost 1.1 kg/m³ i manje. Vlažnost zraka utječe na smanjenje gustoće zraka jer vodena para ima manju gustoću od suhog zraka. Snaga vjetra ovisi o gustoći zraka prema izrazu:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (1.24)$$

Iz izraza (1.24) može se zaključiti da manja gustoća zraka na višim nadmorskim visinama smanjuje raspoloživu snagu vjetra. U područjima gdje je temperatura zraka viša, gustoća zraka se smanjuje te ima negativan utjecaj na proizvodnju energije.

1.5. Statistička obrada brzina vjetra

Statistička analiza temelji se na funkciji gustoće vjerojatnosti pojavljivanja određene brzine vjetra $f(v)$. Funkcija gustoće prikazuje vjerojatnost pojave vjetra brzine v između brzina vjetra v_a i v_b :

$$f(v_a \leq v \leq v_b) = \int_{v_a}^{v_b} f(v) dv, \quad \text{vrijedi} \int_0^{\infty} f(v) dv = 1 \quad (1.25)$$

Integral funkcije gustoće osigurava da se ukupna vjerovatnost pojave bilo koje brzine vjetra zbraja do 1, što je osnovni uvjet svake funkcije gustoće vjerojatnosti

Ako je funkcija $f(v)$ poznata moguće je izračunati srednju brzinu vjetra:

$$\bar{v} = \int_0^{\infty} v \cdot f(v) dv \quad (1.26)$$

Standardna devijacija brzine vjetra:

$$\sigma_v = \sqrt{\int_0^{\infty} (v - \bar{v})^2 \cdot f(v) dv} \quad (1.27)$$

Srednja specifična snaga vjetra određuje raspoloživu snagu po jedinici površine tada glasi:

$$\frac{\bar{P}}{A} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \int_0^{\infty} v^3 \cdot f(v) dv \quad (1.28)$$

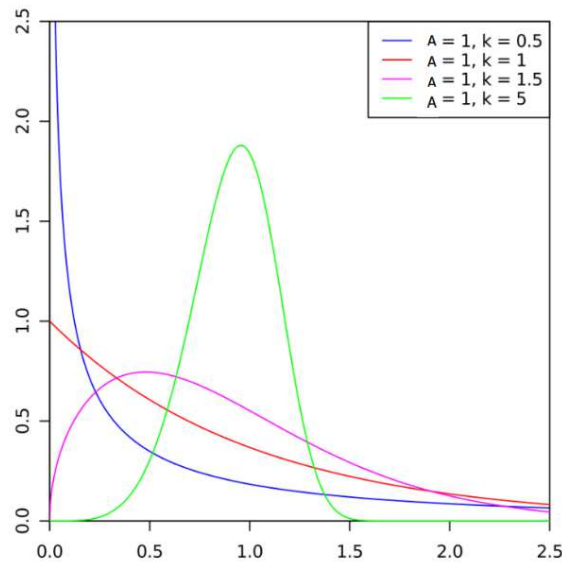
U jednadžbi (1.28), gustoća zraka ρ izravno utječe na procijenjenu raspoloživu snagu vjetra.

1.5.1. Weibullova funkcija gustoće stanja

Weibullova funkcija gustoće vjerojatnosti često se koristi za modeliranje brzine vjetra jer opisuje varijabilnost vjetra u stvarnim uvjetima. Koristi se za izračun snage i godišnje proizvodnje energije te omogućuje predviđanje ekstremnih uvjeta i optimizaciju rada vjetroturbine. Weibullova funkcija gustoće stanja je dvoparametarska funkcija. Definiraju je parametri k - parametar oblika i c - parametar skaliranja. Oba parametra su ovisna o srednjoj brzini vjetra i standardnoj devijaciji brzine vjetra. Weibullova funkcija definirana je kao:

$$f(v) = \frac{k}{c} \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot e\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (1.29)$$

Ovisnost oblika Weibullove funkcije o parametru k prikazana je na slici 1.2. Uži vrh krivulje uzrokuje povećanje parametra k te utječe na pomicanje maksimuma ulijevo. Veći parametar k prikladan za lokacije na kojima vjetar puše konstantnom brzinom uz manje varijacije, pa su velike vjerojatnosti pojave vjetra brzina sličnih onima koje odgovaraju vrijednosti parametra c . Mjestima s visokom varijabilnošću brzine vjetra odgovara kada je $k < 2$. Parametar c određuje horizontalni položaj distribucije i direktno je povezan sa srednjom brzinom vjetra. Zaključno, k kontrolira širinu i oblik, dok c određuje poziciju distribucije duž osi brzine vjetra.

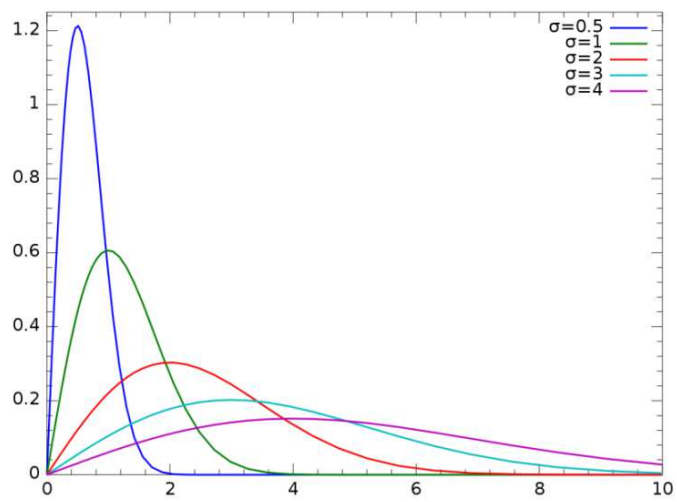


Slika 1.2. Weibullova distribucija

Specijalni slučaj Weibullove funkcije kada se pretpostavi da je $k = 2$, $c = \frac{2\bar{v}}{\sqrt{\pi}}$. Tada je Weibullova distribucija jednaka Rayleighovoj distribuciji. U tom slučaju, funkcija gustoće stanja definirana je kao:

$$f(v) = \frac{2\bar{v}}{\sqrt{\pi}} e^{-\frac{v^2}{2c^2}} \quad (1.30)$$

Najčešće se javlja u prirodnim uvjetima i često se koristi kao aproksimacija u analizi vjetropotencijala. Rayleighova funkcija gustoće stanja je jednostavnija jednoparameterska te je pogodna za aproksimaciju raspodjele brzina vjetra u mnogim slučajevima. Rayleighova distribucija i prikazana je na slici 1.3.



Slika 1.3. Rayleoghova distribucija

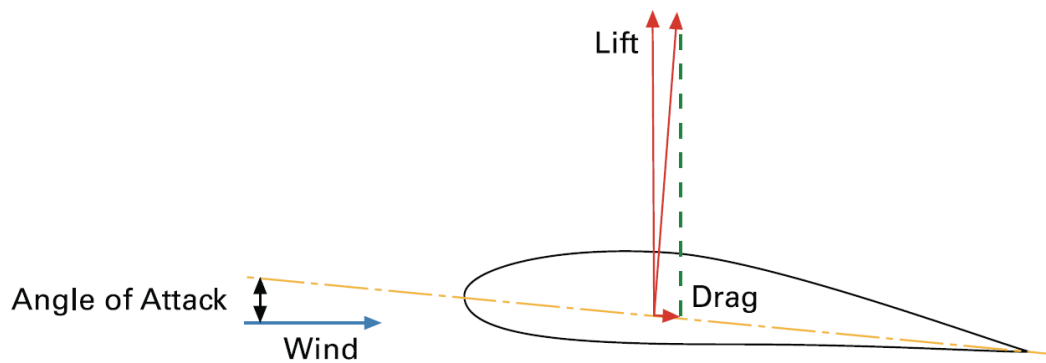
2. Aerodinamički profil lopatice

Drugi razlog zašto se lopatice vjetroturbine mogu okretati je Bernoulijev efekt. Bernoulijev efekt kaže da zrak koji se brže giba ima manji iznosa pritiska. Krilo vjetroturbine dizajnirano je na način da molekule zraka brže putuju s donje strane lopatice, nego s gornje strane i oblikovano je kao nejednolika suza. Strana lopatice niz vjetar ima veliku zakrivljenost, dok je druga strana relativno ravna. Budući da se zrak brže kreće na zakrivljenoj strani lopatice, manji je pritisak na ovoj strani lopatice. Ova razlika u pritisku na suprotnim stranama lopatice uzrokuje da se lopatica uzdignuta prema krivulji aeroprofila.

Učinkovitost lopatice vjetroturbine ovisi o otporu, uzgonu i momentu vrtnje koji proizvodi lopatica. Na te čimbenike utječu veličina, oblik lopatica i broj lopatica. Otpor zraka je sila koja djeluje protiv lopatica te uzrokuje njihovo usporavanje. Lopatice vjetroturbina moraju biti aerodinamične kako bi mogle učinkovito prolaziti kroz zrak. Promjenom kuta lopatica promijenit će se područje okrenuto prema vidljivom vjetru, zbog toga kutovi nagiba lopatica od 10 do 20 stupnjeva obično imaju manji otpor nego veći kutovi. Otpor se također povećava s brzinom vjetra jer što se objekt brže kreće kroz zrak, to je veća sila otpora. Ovo je posebno važno za lopatice vjetroturbina, budući da se vrhovi lopatica kreću kroz zrak puno brže od baze lopatice. Oblik i kut lopatica vjetroturbine mijenja se duž duljine lopatice kako bi se smanjio otpor na vrhovima lopatica.

Uzgon je aerodinamička sila koja omogućuje let zrakoplova i helikoptera. Ista sila djeluje na lopatice vjetroturbina dok se okreću kroz zrak. Uzgon se suprotstavlja sili otpora, pomažući lopatici turbine da učinkovito prolazi kroz molekule zraka. Glavni cilj dobro dizajnirane lopatice vjetroturbine je generirati što više moguće uzgona uz minimiziranje otpora. Količina uzgona koju lopatica može generirati određena je oblikom lopatice, brzinom zraka koji prolazi oko lopatice i kutom lopatice u odnosu na prividni vjetar.

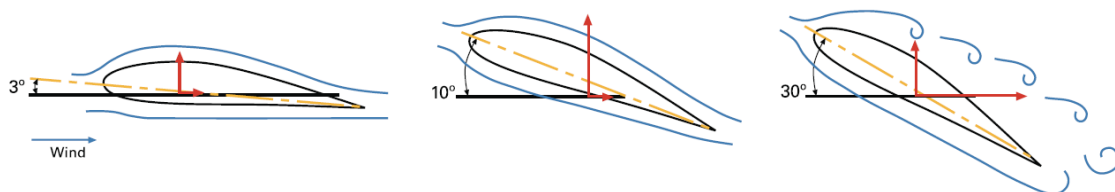
Okretni moment je sila koja ima sposobnost rotacije tijela oko određene osi. Moment je jednak sili pomnoženoj s udaljenošću. To znači da što su lopatice duže, to mogu stvoriti veći okretni moment.[1]



Slika 2.1. Sile uzgona i otpora na lopatici

Lopaticice vjetroturbine rade generirajući uzgon zbog svog oblika. Zakrivljenija strana stvara niske tlakove zraka, dok zrak visokog tlaka gura drugu stranu aeroprofila. Konačni rezultat je sila uzgona okomita na smjer strujanja zraka kao što je prikazano na slici 2.1.

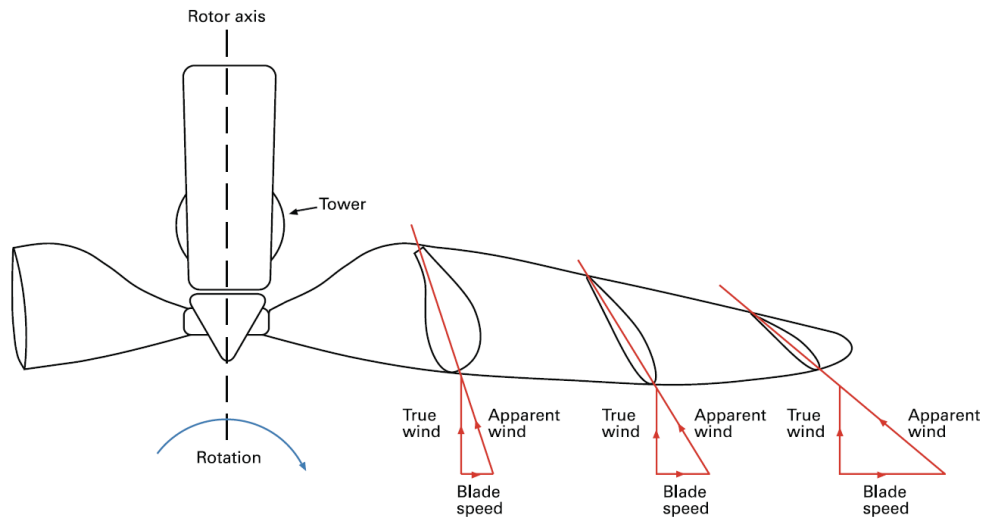
Sila uzgona se povećava kako se lopatica okreće da bi se postavila pod većim kutom prema vjetru te se taj kut zove napadni kut. Pri vrlo velikim napadnim kutovima oštrica koči i uzgon se ponovno smanjuje. Dakle, postoji optimalan napadni kut za generiranje maksimalnog uzgona.



Slika 2.2. Napadni kut na lopatici

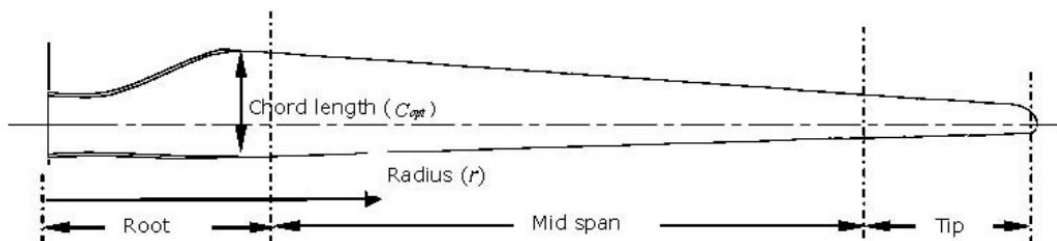
Otpor je sila paralelna s strujanjem vjetra, a također se povećava s napadnim kutom. Ako je oblik aeroprofila dobar, sila uzgona je mnogo veća od otpora, ali pri vrlo velikim napadnim kutovima, posebno kada se oštrica zaustavlja, otpor se dramatično povećava. Dakle, pod kutom malo manjim od maksimalnog kuta podizanja, oštrica postiže svoj maksimalni omjer uzgona i otpora. Najbolja radna točka bit će između opisana dva kuta. Budući da je otpor u smjeru niz vjetar, može se činiti da to ne bi bilo važno za vjetroturbinu jer bi otpor bio paralelan s osi turbine, pa ne bi usporavao rotor. To bi samo stvorilo potisak, silu koja djeluje paralelno s osi turbine stoga nema tendenciju ubrzavanja ili usporavanja

rotora. Prividni vjetar je jači od pravog vjetra, ali njegov kut je manje povoljan. On rotira kutove uzgona i otpora kako bi smanjio učinak sile uzgona koja vuče lopaticu i povećao učinak otpora koji ga usporava. To također znači da sila uzgona doprinosi potisku na rotor.



Slika 2.3. Lopatica vjetroturbine

Promjena ugla napada duž lopatice prikazana je na slici 2.3. Tangencijalna brzina lopatice raste kretanjem po lopatici od korijena. Na taj način se mijenja kut prividnog vjetra napadni kut lopatice, što utječe na aerodinamičke sile uzgona i otpora. Pri većoj udaljenosti od osi rotora, manji napadni kut, ali je veći prividni vjetar.



Slika 2.4. bočni profil lopatice vjetroturbine

Na slici 2.4. prikazan je bočni profil lopatice vjetroturbine te se može uočiti razlika u širini duž lopatice. Pri korijenu profil je deblji kako bi podnio strukturna opterećenja, dok je na vrhu tanji kako bi se smanjio otpor i povećale aerodinamičke karakteristike.

Parametri lopatice sa slike su:

- Korijen lopatice (eng. *Root*)
- Srednji dio lopatice (eng. *Mid – span*)
- Vrh lopatice (eng. *Tip*)
- Dujina tetive lopatice (eng. *Chord length*)
- Polumjer (eng. *Radius*)

Omjer brzine vrha lopatice (eng. *Tip Speed Ratio-TSR*) ili koeficijent brzohodnosti opisuje odnos između brzine vrha lopatice i brzine vjetra, definiran je izrazom:

$$\lambda = \frac{r \omega}{v_{\infty}} \quad (2.1)$$

Gdje su:

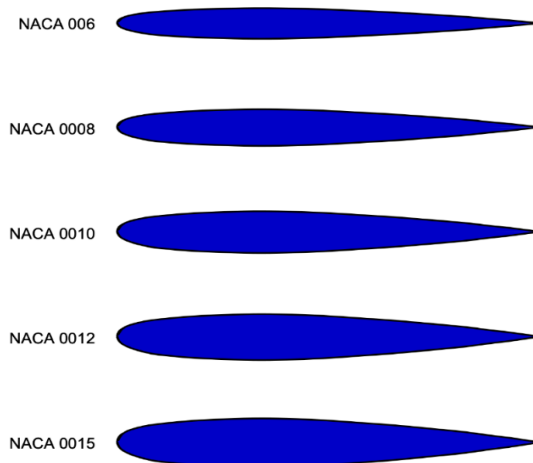
- ω – kutna brzina rotora
- v_{∞} – brzina vjetra koja dolazi na turbinu

Za moderne vjetroturbine vrijedi da je vrijednost koeficijenta brzohodnosti optimalna od 6 do 9 jer je u tom slučaju najbolja ravnoteža između uzgona i otpora.

2.1. Različiti aeroprofil

Moderni aeroprofil su optimizirani za različite situacije primjene. Od manjih i slabijih vjetroelektrana do velikih priobalnih vjetroelektrana. Razvijaju se tako da se smanji otpor, poveća uzgon i optimizira efikasnost.

NACA (National Advisory Committee for Aeronautics) aeroprofil su standardizirani oblici aeroprofila razvijeni u prvoj polovici 20.stoljeća. Koriste se u vjetroturbinama, zrakoplovstvu i drugim primjenama gdje se koristi aerodinamika. Njihove matematičke formule te tablice i vrijednosti različitih koeficijenata u ovisnosti o napadnom kutu nalaze se u izvješćima u internetskoj bazi NACA profila gdje su prikazane stotine aeroprofila kroz nekoliko serija. Na slici 2.5. su prikazani različiti tipovi NACA profila četveroznamenkaste serije. [2]

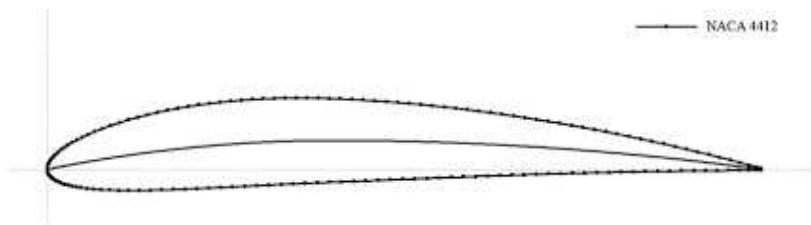


Slika 2.5. NACA aeroprofil

2.1.1. NACA 4412

NACA 4412 je klasični, asimetrični aerodinamički model čije će se specifikacije koristiti za projektiranje vjetroturbine. Oznaka 4412 ima značajke:

- 4 – maksimalna zakrivljenost aeroprofila iznosi 4% dužine tetive
- 4 – maksimalna zakrivljenost aeroprofila nalazi se na 40% dužine tetive
- 12 – maksimalna debljina aeroprofila iznosi 12% dužine tetive

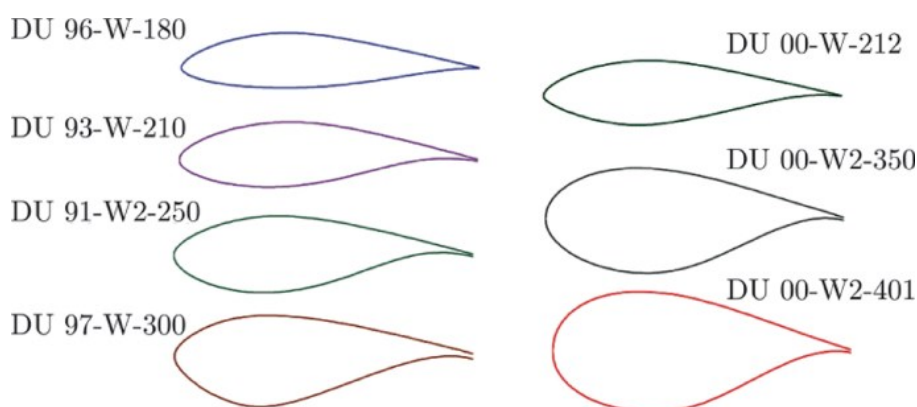


Slika 2.6. NACA 4412

NACA 4412 aeroprofil generira visok koeficijent uzgona, što ga čini pogodnim za aplikacije poput lopatica vjetroturbine, dok je koeficijent otpora niži, što poboljšava učinkovitost pri nižim i srednjim brzinama vjetra. Optimalni radni raspon napadnog kuta za NACA 4412 je između 0° i 15° . U modernim vjetroturbinama, aeroprofil poput NACA 4412 često se koriste u unutarnjem dijelu lopatice, dok se na vrhovima lopatica koriste tanje varijante s manjim otporom (npr. NACA 2412 ili NACA 23012). Za kopnene vjetroturbine prigodni su NACA aeroprofil.[2]

2.2. DU serija

Za vjetroturbine razvijeni su DU (Delft University) aeroprofil, dizajnirani s ciljem poboljšanja efikasnosti i smanjenja opterećenja. Specifičnost DU aeroprofila je povećana debljina lopatice jer im je time poboljšan odnos otpora i uzgona. Pogodne su za priobalne vjetroelektrane zbog svoje izdržljivosti materijala. Na slici 2.7. prikazani su različiti aeroprofil iz DU serije te se može uočiti razlika u debljini u odnosu na NACA profile.



Slika 2.7. Aeroprofil DU serije

DU aeroprofil označeni su prema svojoj debljini, izraženoj kao postotak tetive profila. Neki od najčešće korištenih su:

- DU 93-W-210 – 21% debljina tetive
- DU 97-W-300 – 30% debljina tetive
- DU 00-W-401 – 40% debljina tetive

Deblji aeroprofil koriste se na unutrašnjem dijelu lopatice, dok se tanji koriste bliže vrhu lopatice zbog smanjenog otpora. DU aeroprofil omogućuju veću strukturnu stabilnost, dok NACA profil nude bolju aerodinamičku efikasnost kod manjih lopatica.[3]

3. Vjetroelektrana

Vjetroelektrane su jedan od najbrže rastućih izvora obnovljive energije zbog ekoloških i ekonomskih prednosti. Kao obnovljivi izvor energije omogućuju smanjenje emisije stakleničkih plinova, smanjenje ovisnosti o fosilnim gorivima i dugoročnu isplativost. Vjetroelektrana kao energetska postrojenja sastoji se od više vjetroturbina i infrastrukture koja omogućava proizvodnju, prijenos i upravljanje električnom energijom. Dijele se na: kopnene vjetroelektrane postavljene obično na brdima ili ravninama s jakim vjetrovima, zatim morske vjetroelektrane gdje su vjetrovi jači i stalniji te distribuirane vjetroelektrane koje opskrbljuju energijom lokalne zajednice ili industrijske objekte.

Izgrađene su od 8000 komponenti i više te se najvažnije komponente vjetroelektrane mogu podijeliti u tri kategorije:

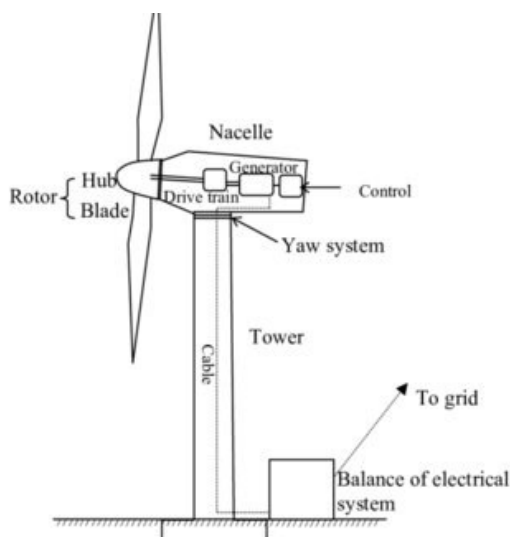
- Mehaničke komponente: lopatice rotora, glava rotora, ležajevi, glavna osovina, mehanička kočnica, mjenjač, pogoni nagiba, pogoni skretanja, sustav za izmjenu topline i dr
- Električne komponente: generator, energetski elektronički pretvarač s harmoničkim filtrima na strani generatora i mreže, transformator, kabeli i dr
- Mehanički i električni sustavi upravljanja.



Slika 3.1. Vjetroelektrane

Na slici 3.2. prikazani su glavni dijelovi jedne vjetroelektrane:

- Rotor (lopaticice) – pretvaraju kinetičku energiju vjetra u rotacijsku energiju
- Glavčina rotora (eng. *Hub*) – spaja lopaticice s osovinom
- Prijenosnik (mjenjač) – povećava brzinu rotacije osovine za pogon generatora
- Generator – pretvara mehaničku energiju u električnu energiju
- Stup (toranj) – drži turbinu na optimalnoj visini zbog bolje iskoristivosti vjetra
- Kućište (eng. *Nacelle*) - sadrži prijenosnik, generator i ostale ključne dijelove turbine
- Električni sustav i kontrolni mehanizmi – upravljaju radom turbine i prilagođavaju nagib lopatica za optimiziranu proizvodnju energije



Slika 3.2. shema vjetroelektrane

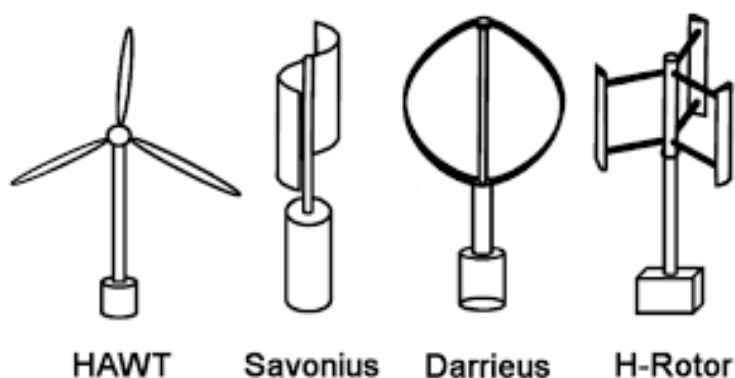
3.1. Vjetroturbina

Ključan dio vjetroelektrana je sama vjetroturbina. Konstrukcijski oblik vjetroturbina razlikuje se prema djelovanju sila na lopaticice, položaju vratila i samom broju lopatica. Prema djelovanju sila postoje vjetroturbine koje koriste silu uzgona i vjetroturbine koje koriste silu otpora. Vjetroturbine mogu imati jednu, dvije ili više lopatica. Vjetroturbine koje koriste silu uzgona imaju aerodinamički oblik lopatica kako bi generirale silu uzgona sličnu principima rada avionskih krila. Darrieus turbine (vertikalno osne) i većina HAWT turbina spadaju u ovu kategoriju. Imaju veću učinkovitost jer koriste veći dio energije vjetra.

Vjetroturbine koje koriste silu otpora za rotaciju koriste razliku tlaka između prednje i stražnje strane lopatice kako bi proizvele rotacijsku silu. Savonius turbine su najpoznatiji primjer ove vrste. Imaju nižu učinkovitost, ali su jednostavnije i rade pri nižim brzinama vjetra.

Prema položaju vratila postoje:

- Vjetroturbine s horizontalnom osi vrtnje (HAWT)
- Vjetroturbine s vertikalnom osi vrtnje (VAWT)



Slika 3.3. različite vrste vjetroturbina

3.1.1. Vjetroturbine s horizontalnom osi vrtnje (HAWT)

Vjetroturbine s horizontalnom osi vrtnje (HAWT) dominiraju u industriji vjetroturbina jer imaju visoku učinkovitost. Rotor je smješten horizontalno u odnosu na tlo dok su lopatice smještene okomito na smjer strujanja vjetra. Prednosti vjetroturbine s horizontalnom osi vrtnje su i mogućnost povećanja visine za iskorištavanje jačih vjetrova. Dok su njihovi nedostaci: složeniji sustav upravljanja i osjetljivost na turbulencije. Podvrste vjetroturbina s horizontalnom osi vrtnje su:

1. Turbina okrenuta prema vjetru (eng. *Upwind turbine*)
2. Turbina okrenuta od vjetra (eng. *Downwind turbine*)

Turbina okrenuta prema vjetru koristi sustav za okretanje koji aktivno prilagođava orijentaciju turbine prema smjeru vjetra. Prednost ovog dizajna je što smanjuje turbulenciju iza stupa, poboljšavajući učinkovitost i smanjujući naprezanja na lopaticama. Složeniji mehanizam za okretanje može povećati troškove održavanja.

Turbina okrenuta od vjetra se ne mora aktivno prilagođavati smjeru vjetra te ne zahtijeva sustav za okretanje, čime se smanjuju operativni troškovi i potreba za dodatnim sensorima. Također, lopatice mogu biti fleksibilnije jer nisu podložne udaru vjetra s prednje strane. Nedostatak je prolazak zraka preko stupa koji uzrokuje povremene turbulencije, što može smanjiti učinkovitost i povećati mehaničko naprezanje na lopaticama.

3.1.2. Vjetroturbine s vertikalnom osi vrtnje (VAWT)

Vjetroturbine s vertikalnom osi vrtnje (VAWT) pripadaju najstarijoj vrsti zbog svoje jednostavnosti. Rotor je smješten vertikalno u odnosu na tlo i lopatice mogu koristiti vjetar iz bilo kojeg smjera te im turbulencije ne stvaraju probleme. Glavni predstavnici vjetroturbina s vertikalnom osi vrtnje su: Darrieus turbine i Savonius turbine

3.1.2.1 Darrieus turbine

Ova vrsta vjetroturbina koristi aerodinamične lopatice raspoređene oko vertikalne osi rotacije. Ima visoku učinkovitost jer može koristiti energiju vjetra iz više smjerova, ali se teško pokreće samostalno bez vanjske pomoći. Potreban je dodatni startni mehanizam, poput malog električnog motora ili kombinacije s drugom vrstom turbine (npr. Savonius) koja može pomoći pri početnoj rotaciji. Zbog velikih sila koje djeluju na lopatice, mehanički stres može biti značajan, što zahtijeva čvrste materijale i dobar dizajn konstrukcije. Koristi se u urbanim i ruralnim područjima gdje vjetar dolazi iz više smjerova.

3.1.2.2 Savonius turbine

Savonius turbine koriste zakrivljene lopatice koje stvaraju razliku tlaka između prednje i stražnje strane lopatice, što rezultira rotacijom. Rade pri nižim brzinama vjetra, što ih čini pogodnima za male instalacije i primjene gdje vjetar nije stalan ili jak. Imaju nižu učinkovitost u usporedbi s Darrieus turbinama jer ne koriste aerodinamičke sile, već samo otpor vjetra. Prednost im je jednostavan dizajn, izdržljivost i mogućnost samostalnog pokretanja bez vanjskih mehanizama. Često se koriste za male energetske sustave, pumpanje vode ili kao dio hibridnih sustava obnovljive energije.

3.2. Konstrukcija vjetroturbina

Dizajn i konstrukcija vjetroturbina određuju njihovu učinkovitost, dugovječnost i ekonomsku isplativost. Uzimaju se u obzir aerodinamički, strukturni i električni aspekti kako bi se optimizirala proizvodnja energije i smanjili gubici.

Glavne opcije u dizajnu i konstrukciji vjetroturbina uključuju:

- broj lopatica (obično dvije ili tri)
- orijentaciju rotora: niz vjetar ili s vjetrom u odnosu na toranj
- materijal, način izrade i profil lopatica
- dizajn glavčine: kruta, nagibna ili zglobna
- kontrolu snage putem aerodinamičke regulacije (kontrola zastoja) ili lopatica s promjenjivim kutom zakreta (kontrola nagiba)
- fiksnu ili promjenjivu brzinu rotora
- orijentaciju pomoću samousklađivanja (slobodno zakretanje) ili izravnom kontrolom (aktivno zakretanje)
- sinkroni ili indukcijski generator (kavezni ili dvostruko napajani)
- mjenjač ili generator s izravnim pogonom

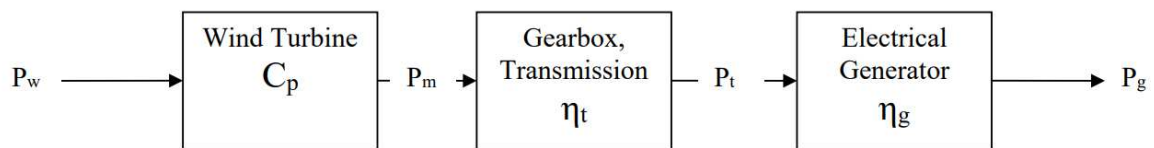
Bitan korak u dizajniranju vjetroturbine je definiranje njezine primjene. Primjena utječe na veličinu turbine, vrstu generatora, način upravljanja te način instalacije i rada. Također, ključni faktori dizajniranja su jednostavnost instalacije, održavanja i konstrukcije. Turbine za elektroenergetske mreže imaju nazivne snage između 500 kW i 3 MW radi optimizacije proizvodnje energije, dok promjeri rotora variraju između 38 m i 90 m. Turbine za udaljene dijelove ili individualne korisnike manjih su dimenzija, s tipičnim snagama između 10 kW i 500 kW.[5]

4. Snaga turbine

Stvarna mehanička snaga u rotaciji krila lopatice ograničena je Betzovim zakonom i ovisi o brzini vjetra, gustoći zraka i površini rotora:

$$P_m = P_w C_p \quad (4.1)$$

$$P_m = \frac{1}{2} C_p \rho A v^3 \quad (4.2)$$



Slika 4.1. snaga turbine

Mehanička snaga u rotaciji krila lopatica spojena je s mijenjačem čime se uvodi efikasnost snage prijenosa:

$$P_t = C_p \eta_t P_w \quad (4.3)$$

Opterećenje može biti električni generator koji će imati svoju efikasnost:

$$P_g = C_p \eta_t P_w \eta_g \quad (4.4)$$

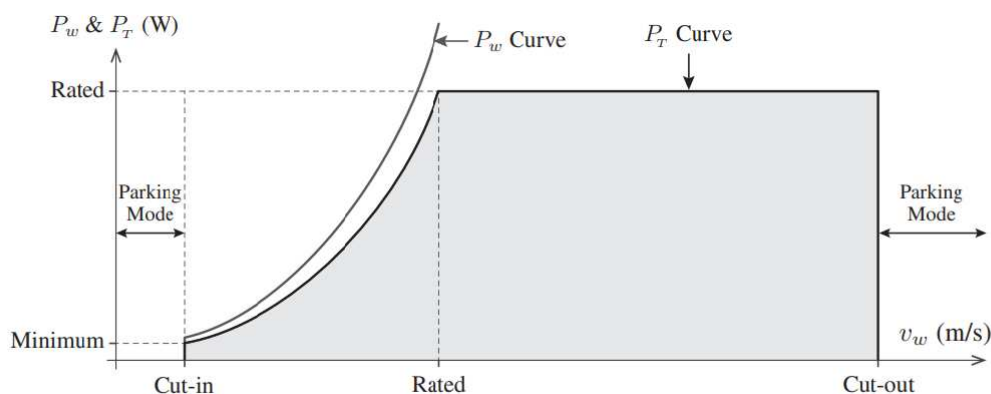
Ukupna izlazna električna snaga sustava glasi:

$$P_e = CF C_p \eta_t P_w \eta_g \quad (4.5)$$

gdje je CF faktor kapaciteta sustava, koji pokazuje koliko turbina radi u odnosu na teoretski maksimum.

$$CF = \frac{\text{stvarna godišnja proizvodnja}}{\text{maksimalna proizvodnja}} \quad (4.6)$$

U realnim uvjetima snaga vjetroturbine nije uvijek jednaka te ovisi o minimalnoj brzini vjetra pri kojoj turbina počinje proizvoditi energiju (3-5 m/s), nazivnoj brzini pri kojoj turbina dostiže maksimalnu snagu te o maksimalnoj brzini pri kojoj se turbina isključuje zbog zaštite od preopterećenja (iznad 25 m/s).



Slika 4.2. Krivulja snage

Na slici 4.2. prikazana je krivulja snage turbine s opisanim brzinama o kojima ovisi snaga turbine. Turbina kada ima dovoljno kinetičke energije u zraku za pokretanje lopatica počinje proizvoditi minimalnu snagu. U linearnoj fazi snaga raste proporcionalno trećoj potenciji brzine dok ne postigne nazivnu snagu i generator proizvodi maksimalnu snagu. Kontrolni sustavi nakon ove točke ograničavaju proizvodnju energije kako bi spriječili opterećenje.

4.1. Regulacija snage vjetroturbine

Regulacija snage vjetroagregata ključna je za zaštitu vjetroturbine od oštećenja pri jako brzim vjetrovima. Također, bitna je za osiguravanje optimalne proizvodnje električne energije iz energije vjetra.

Vjetroagregati dizajnirani su s ciljem rada unutar prethodno određenog raspona snage. Kada brzina vjetra postane prevelika, u tom slučaju snaga vjetroagregata prelazi nazivnu snagu te sustav regulacije snage smanjuje opterećenje na lopaticama vjetroturbine kako bi se smanjio rizik od mehaničkih kvarova. Pravilna regulacija produžuje vijek trajanja vjetroturbine jer smanjuje stalna mehanička opterećenja na lopaticama, generatoru i mjenjaču. Također, na taj način smanjuje se troškovi održavanja i povećanje trajnosti opreme. Pri promjenjivim brzinama vjetra, vjetroturbina može neučinkovito raditi te je potrebna pravilna regulacija snage kako bi se maksimizirala proizvodnja električna energija. Vjetroagregati sudjeluju u reguliranju stabilnosti elektroenergetskog sustava pri poremećajima koji se javljaju u električnoj mreži. Regulacijom snage vjetroturbine pomažu u održavanju integriteta sustava te omogućavaju kvalitetnu i sigurnu isporuku električne energije.

Postoje četiri glavne kategorije regulacije snage: stalna, aktivna, pasivna i mehanička regulacija. Svaka od njih koristi različite principe za prilagodbu izlazne snage turbine.

4.2. Stalna regulacija snage

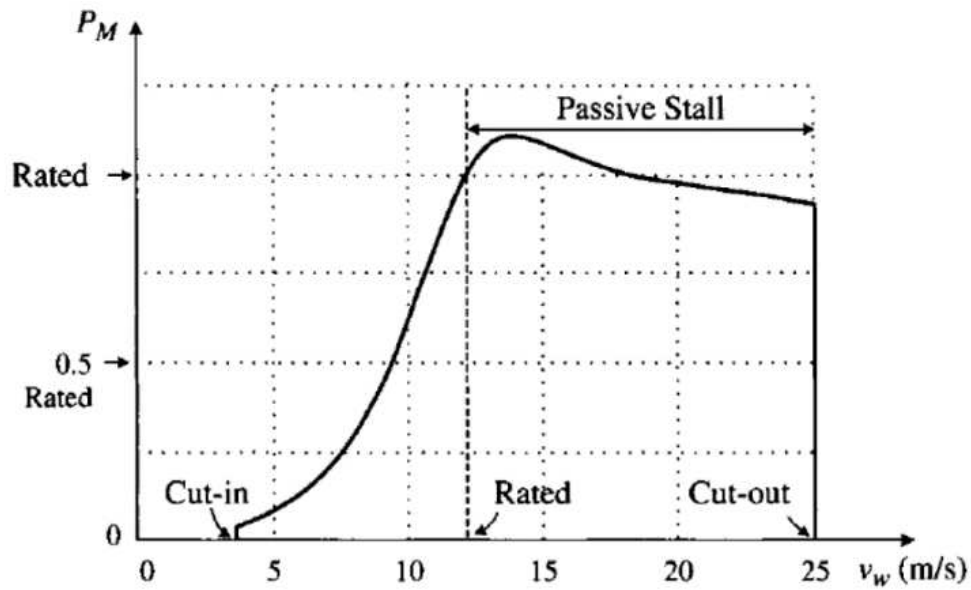
Stalna regulacija snage koristi se u malim vjetroturbinama koje nemaju mogućnost aktivnog prilagođavanja lopatica. Lopatice su fiksno postavljene, a njihov aerodinamički oblik dizajniran je kako bi ograničio maksimalnu snagu koju turbina može proizvesti. Kod jakih vjetrova, otpor prirodno smanjuje učinkovitost lopatice, što sprečava preopterećenje turbine. Prednost stalne regulacije je njena jednostavnost i niski troškovi implementacije. No, nedostatak je manja kontrola nad snagom turbine, što može rezultirati nižom ukupnom učinkovitošću i povećanim rizikom od preopterećenja pri ekstremnim vremenskim uvjetima.

4.3. Aktivna regulacija snage

Aktivna regulacija snage koristi sofisticirane mehanizme koji omogućuju preciznu prilagodbu lopatica i rada turbine ovisno o uvjetima vjetra. Ova metoda omogućava vjetroturbini da optimizira proizvodnju energije pri niskim i umjerenim brzinama vjetra, a da se istovremeno zaštiti od preopterećenja pri jakim vjetrovima. Najčešće metode aktivne regulacije snage su upravljanje zakretanjem lopatica i aktivna kontrola gubitka uzgona. Ove metode omogućuju preciznu kontrolu izlazne snage, ali zahtijevaju složene mehaničke i elektroničke sustave, što povećava troškove održavanja.

4.4. Pasivna regulacija snage

Pasivna regulacija snage temelji se na aerodinamičkim svojstvima lopatica i ne koristi dodatne pokretne dijelove za prilagodbu snage turbine. Ova metoda je često prisutna u starijim i jednostavnijim modelima turbina. Najpoznatija metoda pasivne regulacije je regulacija gubitka uzgona, gdje je lopatica dizajnirana tako da pri određenim brzinama vjetra dolazi do smanjenja uzgona, čime se automatski smanjuje snaga turbine. Također, postoji metoda savijanje i uvrtnje lopatica, gdje su lopatice fleksibilne i same se prilagođavaju pod opterećenjem kako bi smanjile snagu. Prednost pasivne regulacije su niski troškovi te manja potreba za održavanjem, ali nedostatak je manja preciznost u kontroli snage, što može rezultirati smanjenom učinkovitošću.



Slika 4.3. Krivulja pasivne regulacije snage

4.5. Mehanička regulacija snage

Mehanička regulacija snage uključuje fizičke sustave koji smanjuju ili zaustavljaju rad turbine kako bi se spriječilo preopterećenje i osigurao siguran rad. Ova metoda uključuje:

- Aerodinamičke kočnice – usporavaju lopatice pri jakim vjetrovima
- Mehaničke kočnice – koriste se u hitnim situacijama za potpuno zaustavljanje turbine
- Zakretni sustav gondole – turbina se može zakrenuti izvan smjera vjetra kako bi se smanjilo opterećenje na lopatice i generator.

Mehanička regulacija često se koristi kao sigurnosni mehanizmi u kombinaciji s drugim vrstama regulacije snage.

4.6. Metode regulacije snage

Različite metode regulacije snage koriste se ovisno o konstrukciji turbine, uvjetima okoline i zahtjevima mreže. Cilj je postići stabilan rad i maksimizirati energetske učinkovitost pri različitim brzinama vjetra, uz istovremenu zaštitu sustava od preopterećenja.

4.6.1. Upravljanje zakretanjem lopatica

Upravljanje zakretanjem lopatica (eng. *pitch control*) omogućava rotaciju lopatica oko vlastite osi kako bi se prilagodio kut napada vjetra. Pri niskim brzinama vjetra, lopatice se postavljaju pod optimalan kutom za maksimalno iskoristinje kinetičke energije vjetra. Pri jakim vjetrovima, lopatice se zakreću kako bi smanjile silu vjetra i na taj način zaštitile turbinu. Upravljanje zakretanjem lopatica je najpreciznija metoda i najčešće korištena kod modernih turbina, no zahtijeva složen mehanički sustav te visoke troškove održavanja.

4.6.2. Regulacija gubitka uzgona

Regulacija gubitka uzgona (eng. *stall control*) je pasivna metoda koja se oslanja na dizajn lopatica. Pri jakim vjetrovima dolazi do gubitka uzgona, što automatski smanjuje snagu turbine. Ova metoda nema pokretnih dijelova i jeftinija je za održavanje, ali nije toliko precizna kao upravljanje zakretanjem lopatica.

4.6.3. Aktivna regulacija gubitka uzgona

Aktivna regulacija gubitka uzgona (eng. *Active Stall Control*) predstavlja naprednu metodu regulacije snage vjetroturbina koja kombinira prednosti zakretanja lopatica (eng. *pitch control*) i kontrole gubitka uzgona (eng. *stall control*). Za razliku od klasičnog sustava upravljanja zakretanjem lopatica, gdje se lopatice zakreću kako bi povećale uzgon, aktivna regulacija koristi zakretanje lopatica u suprotnom smjeru kako bi se stvorio aerodinamički gubitak uzgona i time ograničio snagu turbine pri visokim brzinama vjetra. Ova tehnologija se primjenjuje u turbinama veće snage jer omogućuje precizniju regulaciju.

4.6.4. Sustav zakretanja gondole

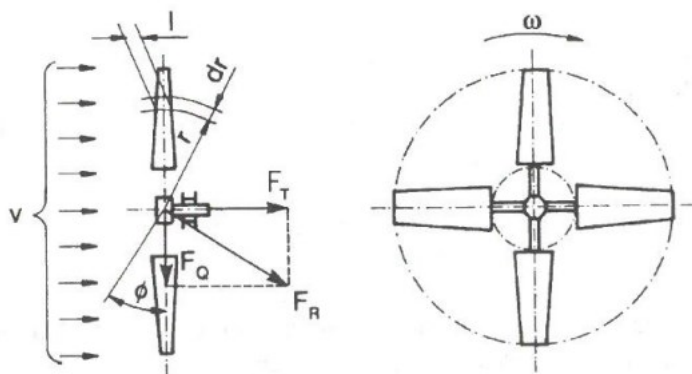
Sustav zakretanja gondole ili nacele omogućava automatsko okretanje gondole turbine prema smjeru vjetra. Na taj način omogućuje se optimalno iskorištavanje energije vjetra i povećava učinkovitost rada turbine. Ovaj sustav koristi senzore i elektromotore kako bi turbine uvijek bile usmjerene prema dominantnom smjeru vjetra.

4.6.5. Elektronička regulacija snage

Moderni vjetroenergetski sustavi koriste napredne elektroničke sustave za regulaciju snage. Promjenjiva brzina rotora, regulacija generatora i kontrola frekvencije osiguravaju stabilnost elektroenergetske mreže i povećavaju učinkovitost proizvodnje energije.

5. Teoretska podloga rada vjetroturbine

Za dimenzioniranje vjetroturbine i računanje optimalne dimenzije lopatica potrebno je poznavati teoretsku podlogu djelovanja pokretnih sila na vjetroturbinu te sve parametre prema kojima se računaju polumjer lopatice, optimalni kut postavljanja α_{opt} i druge važne veličine.



Slika 5.1. radno kolo vjetroturbine

Slika 5.1. (lijevo) prikazuje aerodinamičke sile na lopaticama vjetroturbine s vodoravnim vratilom. Na vjetroturbinu narinuta je brzina vjetra v . Tangencijalna sila F_T pridonosi rotaciji turbine time i proizvodnji korisne snage, a radijalna sila F_Q je okomita na smjer strujanja i stvara opterećenje na turbinu. Rezultatna tih dviju sila F_R određuje efikasnost vjetroturbine jer utječe na prijenos energije iz vjetra. Sile su posljedica stvaranja tlačnog polja oko aerodinamičkog profila. Sami aeroprofil lopatice opstrujava slobodna struja vjetra i vjetroturbina se okreće zbog promjene količine gibanja te struje. Slika 5.1. (desno) prikazuje turbinu s četiri lopatice koje se rotiraju brzinom ω (kutna brzina rotora). Trokut brzina stvara se na presjeku lopatice na polumjeru r iz brzine vjetra v , zatim obodne brzine rotacije turbine $u = r\omega$ i relativne brzine strujanja w . Vrtložne struje se formiraju zbog naglih promjena brzina zraka oko lopatica i uzrokuju poremećajne brzine v_i i u_i , mijenjaju trokut brzina jer se mijenja brzina vjetra i obodna brzina te kut nadstrujavanja relativne brzine na profil. Vrtlozi smanjuju učinkovitost turbine i povećavaju gubitke energije. [4]

U aerodinamici lopatice, sile su podijeljene na uzgonsku silu dL i silu otpora dD . Uzgonska sila djeluje okomito na relativni tok zraka i generira većinu korisne snage, dok otpor djeluje u smjeru relativnog toka zraka i uzrokuje gubitke energije. Matematički su definirane izrazima:

$$dL = C_L \rho \frac{w^2}{2} l dr \quad (5.1)$$

$$dD = C_D \rho \frac{w^2}{2} l dr \quad (5.2)$$

Gdje su:

- C_L, C_D – koeficijenti uzgona i otpora
- l – dužina profila lopatice
- ρ – gustoća zraka
- dr – odsječak lopatice
- w – relativna brzina strujanja zraka oko lopatice.

Prijašnje opisane sile razlažu se u dva smjera:

1. Tangencijalnu silu (dQ) – pokreće turbinu,
2. Aksijalnu silu (dT) – opterećuje rotor i konstrukciju

Koristeći trigonometriju iz trokuta brzine na lopatici vjetroturbine, sile se raspisuju kao:

$$dQ = dL \sin \phi - dD \cos \phi \quad (5.3)$$

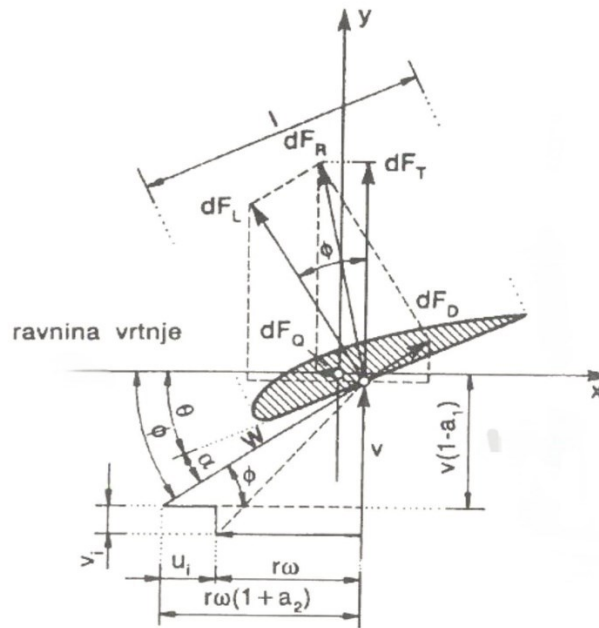
$$dT = dL \cos \phi + dD \sin \phi \quad (5.4)$$

Gdje je ϕ kut strujanja zraka u odnosu na lopaticu. Uvrštavanjem jednadžbi (5.1) i (5.2) u gornje jednadžbe sila (5.3) i (5.4) te dodavanjem omjera otpora i uzgona $k = \frac{C_D}{C_L}$, gornje jednadžbe prelaze u:

$$dQ = C_L \rho \frac{w^2}{2} l \cos \phi (\tan \phi - k) dr \quad (5.5)$$

$$dT = C_L \rho \frac{w^2}{2} l \cos \phi (1 + k \tan \phi) dr \quad (5.6)$$

Koeficijent k određuje efikasnost lopatice te je potrebna manja vrijednost kako bi se više energije prenijelo u korisni rad.



Slika 5.2. Aerodinamičke sile i brzine na elementu lopatice

Kada se napišu jednačbe za tangencijalnu i aksijalnu silu uz izraze iz trokuta brzina sa slike 5.2, slijede nakon sređivanja izrazi sila za broj lopatica B na dijelu turbine dr .

$$dF_Q = \frac{C_L \rho l B}{2} v^2 [(1 - a_1) - k k_p (1 + a_2)] [k_p^2 (1 + a_2)^2 + (1 - a_1)^2]^{1/2} dr \quad (5.7)$$

$$dF_T = \frac{C_L \rho l B}{2} v^2 [k_p (1 + a_2) + k(1 - a_1)] [k_p^2 (1 + a_2)^2 + (1 - a_1)^2]^{1/2} dr \quad (5.8)$$

Gdje su:

- $k_p = r\omega/v$
- a_1 i a_2 inducirani faktori za koje vrijedi: $a_1 = v_i/v$ i $a_2 = u_i/r\omega$
- $k = C_D/C_L$

Iz slike 5.2. vidljivo je da je kut ϕ , kut profila prema ravnini vrtnje, a kut α predstavlja kut nadstujavanja brzine zraka v na lopaticu.

Tangencijalna sila na djeliću turbine dr s krakom r stvara moment rotacije turbine:

$$dM_Q = dF_Q r \quad (5.9)$$

Integriranjem i množenjem s ω , dobiva se izraz za snagu turbine od glave do najvećeg polumjera lopatice turbine.

$$P_Q = \int_r^R \omega dM_Q \quad (5.10)$$

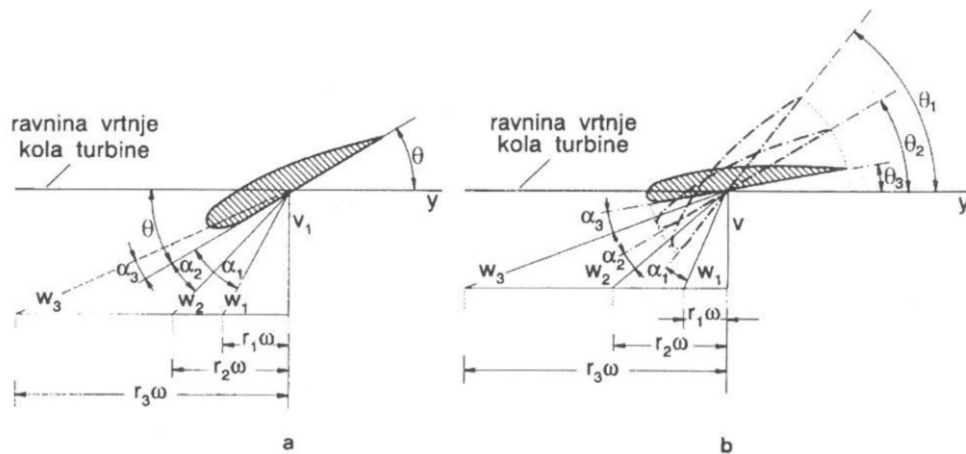
Za algoritam koji će računati optimalne dimenzije lopatica i snagu turbine, potrebne su i jednažbe za aksijalne i tangencijalne sile na elementu dr turbine:

$$dF_T(r) = 4\pi \rho (1 - a_1) a_1 v^2 \int r dr \quad (5.11)$$

$$dF_Q(r) = 4\pi \rho v (1 - a_1) a_2 \int r^2 dr \quad (5.12)$$

Rješavanjem diferencijalnih jednadžbi (5.7), (5.8), (5.11) i (5.12) iterativnom metodom, dolazi se do vrijednosti aksijalnog i tangencijalnog faktora duž lopatice. Aksijalni faktor a_1 opisuje usporenje brzine vjetra dok prolazi kroz rotor turbine. Na unutrašnjim dijelovima lopatice, bliže osi rotora, njegova vrijednost je veća jer je protok zraka sporiji. Prema vrhu lopatice njegova vrijednost opada jer se vjetar brže kreće i ima veću kinetičku energiju. Optimalna vrijednost aksijalnog faktora za maksimalnu iskoristivost energije vjetra je 1/3 prema Betzovom limitu. Tangencijalni faktor a_2 opisuje vrtložnu komponentu brzine vjetra oko lopatica rotora. Turbine su projektirane tako da tangencijalni faktor ne bude prevelik kako bi se smanjili gubici energije u vrtloženju. Njegova teorijska raspodjela duž radijalne udaljenosti treba izgledati kao parabola.

Glavni cilj optimizacije lopatica je postići maksimalan koeficijent snage C_p postavljanjem optimalnog kuta napada α prema relativnoj brzini strujanja zraka. Također, potrebno je osigurati aerodinamički profil lopatice koji se postiže optimalnim omjerom uzgona i otpora. Brzina vjetra i obodna brzina lopatice mijenjaju se duž polumjera rotora, zbog toga lopatice ne mogu biti ravne, nego im se mora mijenjati napadni kut duž polumjera.[4]

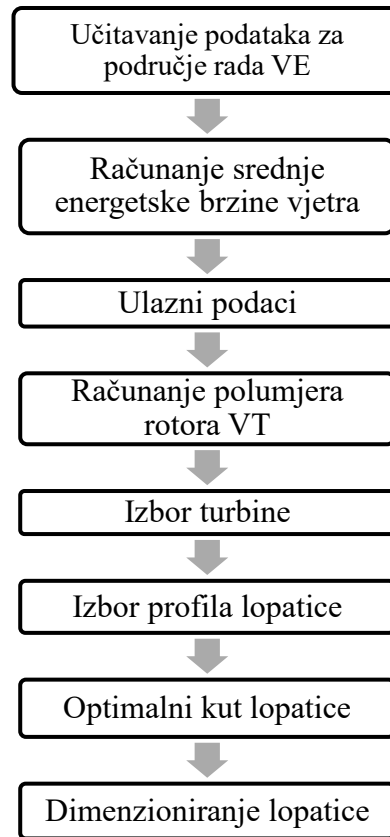


Slika 5.3. Ravna lopatica (a) i uvijena lopatica (b)

Na slici 5.3. prikazana su dva različita aerodinamička dizajna lopatica i trokuti na njihovim profilima. Pri analizi ravne lopatice sa slike 5.3 (a) može se uočiti da nema promjene kuta uvijenosti ϕ , što znači da je lopatica optimalna na jednom dijelu radijusa. No, zato što kut relativnog strujanja θ nije isti duž lopatice smanjuje se efikasnost. Ravna lopatica pogodna je za jednostavne konstrukcije, ali s nižom iskoristivosti energije vjetra. U slučaju prikazane uvijene lopatice na slici 5.3 (b), mijenja se kut uvijenosti ϕ duž radijusa omogućavajući optimalno usmjeravanje strujanja zraka. Uvijena lopatica ima veću efikasnost jer omogućava konstantan optimalni kut α na cijeloj dužini lopatice te su manji vrtložni gubici i veća proizvodnja energije. Kut relativnog strujanja θ varira duž lopatice jer ovisi o kombinaciji obodne i apsolutne brzine strujanja zraka.

6. Optimalne dimenzije lopatice

Cilj ovog diplomskog rada je napisati numerički model optimalnih dimenzija vjetroturbine korištenjem programa MATLAB prema prikazanom dijagramu toka.



Slika 6.1. Dijagram toka programa optimalnih dimenzija lopatica

6.1. Srednja energetska brzina

Srednja energetska brzina vjetra v_{sr} ključan je parametar u analizi vjetroturbina jer uzima u obzir realni energetske doprinos različitim brzinama vjetra, odnosno koristi se za procjenu kinetičke energije dostupne za proizvodnju električne energije jer kinetička energija vjetra proporcionalno raste s trećom potencijom brzine. Srednja energetska brzina v_{sr} definirana je formulom:

$$v_{sr} = \left[\frac{\sum_i^n v_i^3 t_i}{\sum_i^m t_i} \right]^{\frac{1}{3}} \quad i = v_u; n = v_{iz} \quad (6.1)$$

Gdje su:

- v_i – brzina vjetra u određenom vremenskom intervalu (m/s)
- t_i – vrijeme trajanja brzine v_i (s)
- $\sum_i^m t_i$ – ukupno trajanje promatranja (s)

Brzina vjetra v_u je ulazna brzina početka davanja snage u turbinu u momentu kad su savladani otpori okretanja sustava, a v_{iz} je brzina isključenja rada turbine.

Pri učitavanju podataka o brzini vjetra i vremenskim intervalima potrebno je uzeti obzir donju i gornju granicu brzine vjetra koje definiraju radni interval vjetroturbine u kojem može raditi efikasno i sigurno. Donja granica brzine vjetra ili početna brzina vjetra predstavlja najnižu brzinu vjetra pri kojoj vjetroturbina počinje proizvoditi električnu energiju. Tipične vrijednosti za vjetroturbine iznose između 3 m/s i 5 m/s. Gornja granica brzine vjetra ili maksimalna radna brzina je najveća brzinu pri kojoj vjetroturbina može sigurno raditi i nakon koje se vjetroturbina mora isključiti kako ne bi došlo do oštećenja. Za moderne vjetroturbine tipične vrijednosti maksimalne radne brzine vjetra iznose između 20 m/s i 25 m/s. Gornja granica brzine vjetra za energetska analizu je između 12 m/s i 15 m/s. U slučaju tehničke analize i analize opterećenja ta granica bi trebala biti u intervalu između 20 m/s i 25 m/s. U proračunima ekstremnih uvjeta područja i analize sigurnosti, uzimaju se vrijednosti veće od 25 m/s za područje gdje udari vjetra mogu iznositi i do 40 m/s, poput snage bure u Dalmaciji.

U programu za izračun dimenzija lopatica postaviti će se gornja granica brzine vjetra na vrijednost od 15 m/s jer tada snaga vjetroturbine postiže svoj maksimum. Brzine iznad te granice ne povećavaju proizvodnju energije. Donja granica bit će aritmetička sredina intervala tipičnih vrijednosti vjetra, koja iznosi 4 m/s.

Potprogram za računanje srednje energetske brzine:

```
%% ** Računanje srednje energetske brzine**  
v_u = 4;  
v_iz = 15;  
  
v_indeksi = (v >= v_u) & (v <= v_iz);  
v_interval = v(v_indeksi);  
t_interval = t(v_indeksi);  
  
brojnik = sum((v_interval.^3) .* t_interval);  
nazivnik = sum(t_interval);
```



```

v_sr = (brojnik / nazivnik)^(1/3);

fprintf('Srednja energetska brzina: %.2f m/s\n', v_sr);

```

Tipične vrijednosti srednje energetske brzine vjetra kreću se u intervalu od 6 m/s do 10 m/s. U programu se pretpostavljaju početni podaci za lokaciju postavljanja vjetroturbine. U stvarnosti koristili bi se izmjereni podaci. Brzine će se zadati MATLAB-ovom funkcijom *wblrnd*, koja generira slučajne uzorke iz Weibullove distribucije. Osigurano je da sve vrijednosti brzine vjetra iznose najmanje 2 m/s te najviše 25 m/s.

Parametri Weibullove distribucije za brzinu vjetra**

```

c_v = 8;
k_v = 2;
n_samples = 20;

v_weibull = wblrnd(c_v, k_v, 1, n_samples);
v_weibull = sort(v_weibull);
v_weibull = max(v_weibull, 2);
v_weibull = min(v_weibull, 25);

% Dodavanje ravnomjerno raspoređenih brzina do 25 m/s
v_fixed = linspace(15, 25, 10);
v = unique([v_weibull, v_fixed]); % Spajanje i uklanjanje duplikata

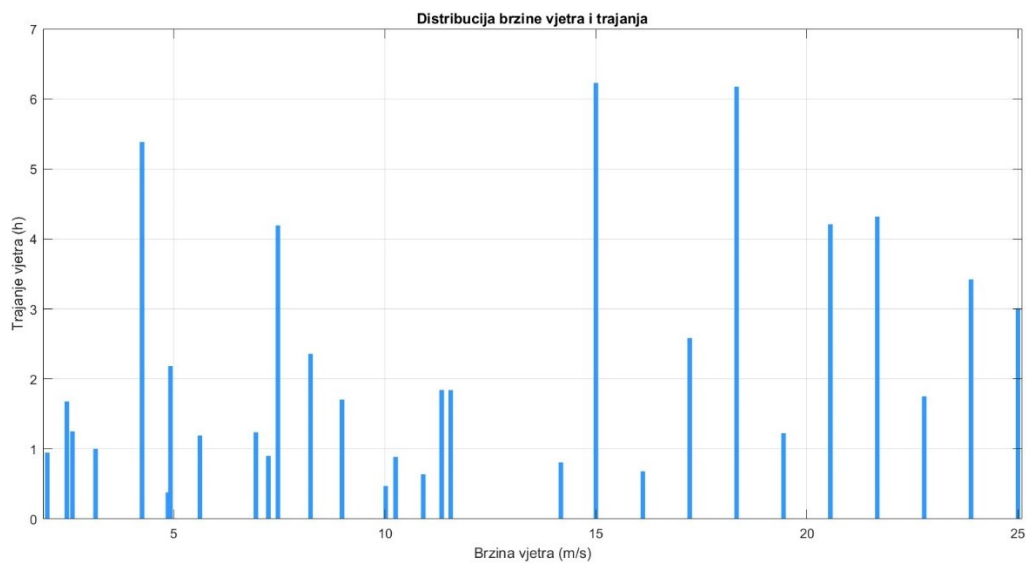
c_time = 10000;
k_time = 1.5;

t = round(wblrnd(c_time, k_time, size(v)));
t = max(t, 600);
t = min(t, 12 * 3600);

```

Slika 6.2. Weibullova distribucija u MATLAB-u

Na slici 6.3. je prikazana nasumično generirana Weibullova distribucija brzina vjetra te predviđeno trajanje vjetra.



Slika 6.3. prikaz Weibullove distribucije

6.2. Optimalne dimenzije lopatica

Drugi potprogram za programiranje dimenzija lopatica vjetroturbine sastoji se od zadavanja ulaznih podataka, zatim se računa polumjer radnog kola turbine te iz dobivenih podataka računa se koeficijent brzohodnosti prema kojem se odabira sama turbina.

6.2.1. Ulazni podaci

Ulazni podaci za projektiranje vjetroturbine ovise o dugoročnim meteorološkim mjerenjima na lokaciji postavljanja vjetroturbine. Također, ovise o tehničkim specifikacijama projekta te o planiranoj proizvodnji električne energije i ograničenjima električne mreže. Ulazni podaci koji su ključni za proračun dimenzija lopatice su:

- a) Nazivna snaga turbina P_s (W)

Nazivna snaga turbine predstavlja maksimalnu snagu koju turbina može proizvesti pri optimalnim uvjetima. Određuje se prema zahtjevima projekta vjetroelektrane ili kapacitetu električne mreže na koju će biti priključena. Za male turbine, vrijednosti snage turbine iznose

do nekoliko stotina kW, dok za velike komercijalne turbine vrijednosti se penju do nekoliko MW.

b) Učinkovitost sustava η_s

Učinkovitost sustava objedinjuje gubitke u mehaničkom i električnom sustavu vjetroturbine i njegova vrijednost iznosi između 85% i 95% ovisno o tehničkim specifikacijama turbine.

c) Koeficijent snage C_p

Koeficijent snage prikazuje koliko energije vjetra može iskoristiti vjetroturbina. Prema Betzovom zakonu gornja granica koeficijenta snage C_p iznosi 0.593, dok moderne izvedbe postižu vrijednosti od 0.4 i 0.5.

d) Mehanička učinkovitost η_m

Mehanička učinkovitost predstavlja učinkovitost prijenosa mehaničke energije iz rotacije lopatica na osovину generatora. Njegove tipične vrijednosti su između 90% i 95%.

e) Srednja energetska brzina v_{sr}

Izračunava se iz meteoroloških podataka za lokaciju vjetroturbine i karakteristične vrijednosti se kreću u intervalu od 6 m/s do 10 m/s.

f) Kutna brzina rotora ω_{pr} (rad/s)

Kutna brzina rotora opisuje brzinu rotacije rotora vjetroturbine i računa se:

$$\omega = \frac{2\pi N}{60} \quad (6.2)$$

Tipične vrijednosti kutne brzine su od 1 rad/s do 2 rad/s za velike vjetroturbine te mogu biti fiksne ili promjenjive. Moderni sustavi koriste regulaciju brzine rotora kako bi održali optimalan rad turbine. Za potrebe proračuna, koristit će se fiksna kutna brzina rotora.

```
%% ** Ulazni podaci **
P_s = 2e6;          % Nazivna snaga VT - 2 MW
rho = 1.225;       % Standardna gustoća zraka
C_p = 0.45;       % Koeficijent snage
eta_m = 0.95;     % Mehanička učinkovitost
eta_s = 0.9;      % Učinkovitost sustava
```

U tablici 1. navedeni su odabrani ulazni podaci za projektiranje vjetroturbine, koje je moguće unutar programa mijenjati ovisno o potrebnim karakteristikama.

Tablica 1. Ulazni podaci

Nazivna snaga, P_s	2 MW
Gustoća zraka, ρ	1.225 kg/m ³
Koeficijent snage, C_p	0.45
Učinkovitost sustava, η_s	0.95
Mehanička učinkovitost, η_m	0.9
Kutna brzina, ω	1.0 rad/s

6.2.2. Računanje polumjera lopatice

Iz ulaznih podataka računa se polumjer lopatice vjetroturbine koristeći formulu snage na izlazu iz pogonskog stroja P_s :

$$P_s = \frac{1}{2} C_p \eta_M \eta_s \rho v_{sr}^3 A \quad (6.3)$$

Tada je površina radnog kola definirana kao:

$$A = \frac{P_s}{\frac{1}{2} C_p \eta_M \eta_s \rho v_{sr}^3} \quad (6.4)$$

Uvrštavanjem $A = R^2 \pi$, konačno formula za izračun polumjera rotora glasi:

$$R = \sqrt{\frac{P_s}{\frac{1}{2} \pi C_p \eta_M \eta_s \rho v_{sr}^3}} \quad (6.5)$$

Potprogram za računanje polumjera rotora u MATLAB-u prikazan je sljedećim kodom:

```
%% **Računanje polumjera rotora**
R = sqrt(P_s / (0.5 * pi * rho * C_p * eta_m * eta_s *
v_sr^3));
R_round = round(sqrt(P_s / (0.5 * pi * rho * C_p * eta_m *
eta_s * v_sr^3)));
fprintf('Polumjer rotora vjetroturbine: %.2f m\n', R);
fprintf('Polumjer rotora vjetroturbine: %.2f m\n', R_round);
```

6.2.3. Računanje brzohodnosti

Formula za brzohodnost (K_p) ili brzinski omjer (λ) je definirana kao omjer tangencijalne brzine vrha lopatice ($R \cdot \omega$) i projektne brzine vjetra (v_{pr}):

$$K_p = \lambda = \frac{R\omega}{v_{pr}} \quad (6.6)$$

Brzohodnost je bitan parametar za izbor vjetroturbine te pokazuje koliko brzo se lopatice okreću u odnosu na narinuti vjetar. U slučaju preniske brzohodnosti, lopatice sporo rotiraju i dolazi do gubitka energije. Kada je brzohodnost previsoka, lopatice rotiraju prevelikom brzinom što uzrokuje gubitke i povećava otpor zraka.

Projektna brzina i srednja energetska brzina vjetra nisu jednake po iznosu, ali zbog jednostavnosti proračuna pretpostavit će se da su jednake u pisanju programa.

```
%% **Računanje brzohodnosti Kp**  
omega = 1.0;  
K_p = (R * omega) / v_sr;  
fprintf('Brzohodnost vjetroturbine Kp = %.6f\n', K_p);
```

6.2.4. Rezultati i izbor turbine

Prema rezultatima ključnih početnih parametara vjetroturbine, dobivenih proračunom u programu MATLAB odabire se vjetroturbina s karakteristikama navedenima u tablici 2.

```
Srednja energetska brzina: 8.74 m/s  
Polumjer rotora vjetroturbine: 63.59 m  
Polumjer rotora vjetroturbine: 64.00 m  
Brzohodnost vjetroturbine: Kp = 7.273930
```

Za izračunati koeficijent brzohodnosti, predlaže se vjetroturbina s horizontalnom osi rotacije s tri lopatice.

Tablica 2. Izbor turbine

TIP VJETROTURBINE	BROJ LOPATICA (B)	BRZOHODNOST (K_p)
Savonius turbina	2-3	0.5-2
Darrieus turbina	2-3	3-6
Propelerna (horizontalna) turbina	3	6-9
Viskoučinkovito propelerna turbina	2-3	8-12

6.3. Izbor profila lopatice

Proces izbora profila lopatice uključuje:

- a) Analiza aerodinamičkih karakteristika:

Profil lopatice bira se tako da koeficijent uzgona C_L i koeficijent otpora C_D zadovoljavaju potrebne karakteristike pri zadatom narinutom kutu α . Aerodinamičke karakteristike ovise o obliku profila i sami izbor profila svodi se na matematičke ovisnosti koeficijenata uzgona C_L i otpora C_D o narinutom kutu α :

$$C_L = f(\alpha) \quad (6.7)$$

$$C_D = f(\alpha) \quad (6.8)$$

Također, postoji i međusobna ovisnost između uzgona i otpora, koja glasi:

$$C_L = f(C_D) \quad (6.9)$$

- b) Optimizacija uzgona i otpora

Aerodinamičku efikasnost turbine, povećava omjer koeficijenata C_L i C_D koji mora biti maksimalan. Odnosno, za svaki narinuti kut α biraju se profili s minimalnim otporom i maksimalnim uzgonom. Za početni dizajn koriste se gotovi aerodinamički podaci poput NACA profila. Nakon što se odabere odgovarajući profil lopatice, potrebno je izračunati induksijske faktore a_1 i a_2 . Za izračun induksijskih faktora koriste se jednadžbe polinomne aproksimacije za koeficijent uzgona i otpora u ovisnosti o kutu napada α :

$$C_L = a_0 + a_1\alpha + a_2\alpha^2 + a_3\alpha^3 \quad (6.10)$$

$$C_D = b_0 + b_1\alpha + b_2\alpha^2 + b_3\alpha^3 \quad (6.11)$$

Gdje su:

- a_0, a_1, a_2, a_3 – koeficijenti aproksimacije za uzgon C_L
- b_0, b_1, b_2, b_3 – koeficijenti aproksimacije za otpor C_D

Za različite vrijednosti koeficijenata uzgona i otpora iz tablice profila lopatice (NACA) u ovisnosti o narinutom kutu, aproksimira se polinom trećeg stupnja u programu MATLAB. U literaturi i bazama aeroprofila pronalazi se korištenje aproksimacije polinoma trećeg stupnja kao optimalnog rješenja za aeroprofile poput NACA i DU serija jer dovoljno precizno opisuje ponašanje funkcija između linearnog porasta, nelinearnih efekata i smanjenje uzgona bez problema oscilacija viših stupnjeva. [2]

Tablica 3. Koeficijenti profila NACA 4412

$\alpha(^{\circ})$	C_L	C_D
-5	0.2	0.02
0	0.5	0.01
5	1.0	0.015
10	1.3	0.03
15	1.2	0.06
20	0.8	0.1

U tablici 3. prikazan je tipični raspon napadnih kutova od -5° do 20° za NACA profil 4412. Također, prikazano je da u slučaju tog aeroprofila koeficijent uzgona ima linearan rast do 15° nakon čega dolazi do naglog pada uzgona. NACA 4412 ima mali otpor pri malim narinutim kutevima te koeficijent otpora eksponencijalno raste s povećanjem kuta.

6.3.1. Indukcijski faktori

Sljedeći korak u projektiranju vjetroturbine je računanje induksijskih faktora: aksijalni a_1 i tangencijalni a_2 . Indukcijski faktori određuju kako lopatica vjetroturbine mijenja strujanje zraka kroz rotor vjetroturbine. Rješavanjem nelinearnih jednadžbi diferencijalne sile momenta i potiska, iterativnom metodom dobivaju se induksijski faktori.

U programu MATLAB koristi se Gauss-Seidel iterativna numerička metoda za vrijednosti aksijalnog i tangencijalnog faktora za različite radijalne pozicije polumjera r . Gauss – Seidel metoda koristi prethodno izračunate vrijednosti za sljedeće izračune u istoj iteraciji. Odabrana je ta metoda jer ima bržu konvergenciju u odnosu na Jacobi metodu te je jednostavnija za implementirati. Sustav jednadžbi za Gauss-Seidel metodu glasi:

$$a_1 = f_1(a_1, a_2) \quad (6.12)$$

$$a_2 = f_2(a_1, a_2) \quad (6.13)$$

Formule za sljedeći korak u iteraciji $k+1$ izražene su kao:

$$a_1^{(k+1)} = f_1(a_1^k, a_2^k) \quad (6.14)$$

$$a_2^{(k+1)} = f_2(a_1^k, a_2^k) \quad (6.15)$$

Iterativna metoda zaustavlja se kad je zadovoljna sljedeća nejednakost:

$$|a_1^{(k+1)} - a_1^k| < \varepsilon \quad (6.16)$$

$$|a_2^{(k+1)} - a_2^k| < \varepsilon \quad (6.17)$$

Gdje ε označava kriterij konvergencije odnosno kriterij zaustavljanja metode.

Glavna petlja iteracije induksijskih faktora prolazi kroz sve brzine vjetra i računa brzinski omjer (λ_r). Formula iz trokuta snaga za brzinski omjer glasi:

$$\lambda_r = \frac{r\omega}{v \sqrt{\frac{1-a_1}{1+a_2}}} \quad (6.18)$$

Korištenjem diferencijalnih jednadžbi opisanih u petom poglavlju, računaju se induksijski faktori, optimalni kut α i kut uvijenosti ϕ .

```
%% **Iterativno traženje induksijskih faktora**  
B = 3; % Broj lopatica  
r = linspace(5, R, 100); % radijalna udaljenost od 5 m do  
polumjera R
```



```

dr = [diff(r), mean(diff(r))]; % diferencijal radijalnog
opsega

% Početne vrijednosti indukcijskih faktora
a1 = 0.2 * ones(size(r));
a2 = 0.02 * ones(size(r));
tol = 1e-6; % tolerancija za iteracije
max_iter = 300; % maksimalni broj iteracija
relax_factor = 0.2; % stabilizacija iteracija

%% **Interpolacija aeroprofilnih podataka**
alpha_range = [-10, -5, 0, 5, 10, 15, 20];
CL_data = [0.0, 0.2, 0.6, 1.1, 1.3, 1.2, 1.0];
CD_data = [0.02, 0.015, 0.012, 0.014, 0.02, 0.04, 0.06];

CL_interp = @(alpha) max(interp1(alpha_range, CL_data, alpha,
'spline', 'extrap'), 0.1);
CD_interp = @(alpha) interp1(alpha_range, CD_data, alpha,
'spline', 'extrap');

for j = 1:length(v)
    v_current = v(j);
    omega = 1.0;
    lambda_r = (r .* omega) ./ (v_current .* sqrt((1-
a1)./(1+a2))); % Minimalna vrijednost 0.5

    for iter = 1:max_iter
        a1_old = a1;
        a2_old = a2;

        phi = atan((1 - a1) ./ ((1 + a2) .* lambda_r));
        theta = atan(a2 ./ max((1 - a1), 0.01));
        alpha_opt = rad2deg(phi-theta);

        CL = CL_interp(alpha_opt);
        CD = CD_interp(alpha_opt);
        k = max(CD ./ CL, 0.01);

        dF_T = (CL .* rho .* B / 2) .* v_current^2 .*
((lambda_r .* (1 + a2) + k .* (1 - a1)) .* cos(phi)) .* dr;

```

```

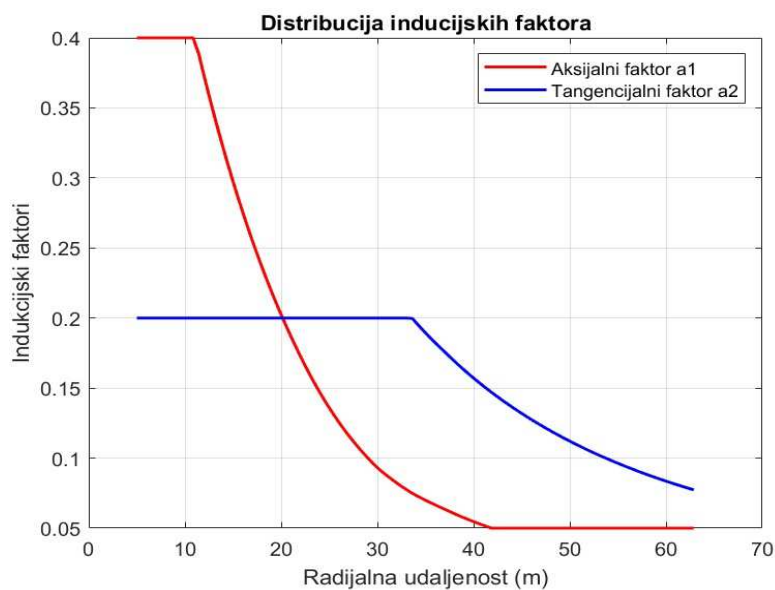
        dF_Q = (CL .* rho .* B / 2) .* v_current^2 .* sqrt((1
- a1).^2 + k.^2 .* (1 +a2).^2).*dr;
        dM_Q = dF_T .* r;
        dP_Q = omega .* dM_Q;

        new_a1 = max(0.05, min(0.40, (4 * sin(phi).^2) ./ (B
* lambda_r .* CL)));
        new_a2 = max(0.01, min(0.20, (4 * sin(phi) .*
cos(phi) .* (1 + a1)) ./ (B * lambda_r .* CL)));
        relax_factor = 0.5 * exp(-iter / max_iter); % Jača
stabilizacija
        a1 = (1 - relax_factor) * a1 + relax_factor * new_a1;
        a2 = (1 - relax_factor) * a2 + relax_factor * new_a2;

        if max(abs(a1 - a1_old)) < tol && max(abs(a2 -
a2_old)) < tol
            break;
        end
    end
end
end

```

Funkcije koeficijenata uzgona i otpora koriste *spline* interpolaciju da bi glatko aproksimirale poznate aerodinamičke podatke. *Spline* interpolacija sprječava nagla osciliranja koja bi se mogla javiti kod linearne interpolacije. Relaksacijski faktor dodatno stabilizira iteracije kako bi spriječio oscilacije.



Slika 6.4. Distribucija induksijskih faktora

Prema slici 6.4 vrijednost aksijalnog faktora a_1 (crvena linija) pada s povećanjem radijalne udaljenosti što je teorijski opravdano. U slučaju konstante vrijednosti ili njegovog povećanja prema krajevima lopatice, vjetroturbina nije optimalno dizajnirana za pretvorbu energije. Na unutarnjim dijelovima lopatice njegova vrijednost mora biti veća jer je brzina zraka manja, a lopatica usporava protok zraka. Tangencijalni faktor a_2 (plava linija) pokazuje kako se mijenja prijenos momenta duž radijalne udaljenosti. Ima konstantnu početnu vrijednost te postepeni pad prema vanjskim dijelovima lopatice što upućuje na nepreciznost u iterativnom algoritmu koji je zbog svoje složenosti i malih vrijednosti parametara teško prilagoditi. Graf tangencijalnog faktora a_2 u teoriji mora imati oblik parabole jer je u unutarnjim dijelovima lopatice vrijednost manja zbog manjeg momenta. Dok je najveći na sredini lopatice jer se u tom dijelu ostvaruje najveći zakretni moment.

6.4. Izračunavanje optimalnog kuta lopatice

Nakon što je odabran profil lopatice te su izračunati aksijalni i tangencijalni faktori, računa se optimalni kut lopatice α_{opt} . Optimalni kut je kut između efektivnog smjera brzine strujanja zraka i napadne površine lopatice. Pri projektiranju aeroprofila potrebno je maksimizirati aerodinamičku učinkovitost odnosno omjer koeficijenta uzgona i otpora, čime se postiže optimalna iskoristivost energije vjetra. Optimalni kut računa se u petlji iterativnog pronalaženja induksijskih faktora jer je potrebno pronaći brzinu vjetra pri kojoj turbina ima maksimalnu snagu. Potrebni parametri računaju se iz interpolacije aerodinamičkih podataka unutar iteracijske petlje. Iz trokuta brzina računaju se relativni kut strujanja ϕ , kut profila prema ravnini vrtnje θ i optimalni napadni kut lopatice α prema formula:

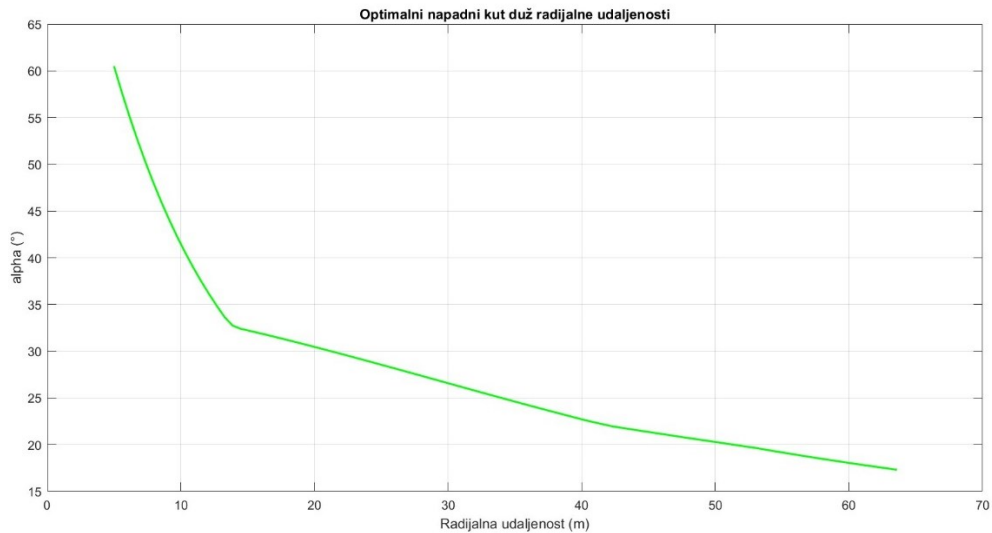
$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{1 - a_1}{(1 + a_2)\lambda_r} \right) \quad (6.19)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{a_2}{1 - a_1} \right) \quad (6.20)$$

$$\alpha = \phi - \theta \quad (6.21)$$

Na slici 6.5 prikazano je kako se optimalni napadni kut α mijenja duž radijusa. Početna vrijednost α je oko 60° i opada prema krajevima lopatice. Početna vrijednost je prevelika zbog nepreciznosti iteracije induksijskih faktora, ali pad kuta prema krajevima lopatica je u skladu s aerodinamičkim zakonima jer unutarnji dijelovi lopatice zahtijevaju veće napadne kutove zbog niže relativne brzine zraka. Ova optimizacija omogućava

maksimalni prijenos uzgona na lopaticu. Proračunom u MATLAB-u optimalan kut α_{opt} iznosi 14.29° , u teoriji njegova vrijednost treba iznositi između 10° i 20° .



Slika 6.5. optimalni kut duž radijusa

6.5. Dimenzioniranje širine lopatice

Širina lopatice $l(r)$ varira s radijalnom udaljenosti r od središta rotora. Cilj je osigurati ravnomjernu raspodjelu opterećenja i optimalnu aerodinamičku iskoristivost duž cijele dužine lopatice. Kako bi lopatica bila aerodinamički optimizirana, koristi se parabolična funkciju koja određuje kako se širina mijenja duž lopatice:

$$l(r) = l_{max} \left(1 - \left(\frac{r - r_{max}}{R - R_{max}} \right)^2 \right) \quad (6.22)$$

Gdje su:

- l_{max} – maksimalna širina lopatice na 40% ukupne duljine lopatice
- r_{max} – radijalna pozicija maksimalne širine
- R – polumjer rotora
- r – trenutna radijalna udaljenost od središta rotora

Kod koji računa širinu lopatice kao funkciju od r :

```

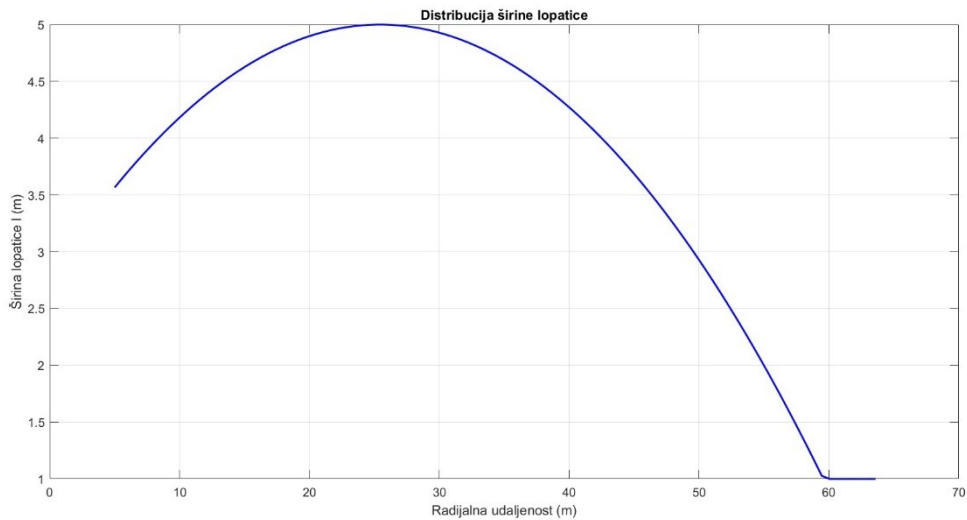
%% **Dimenzioniranje širine lopatice l = f(r)**
r_max_width = R * 0.4; % Radijalna pozicija maksimalne širine
                    (40% lopatice)
l_max = max(l) * 1.1; % Maksimalna širina povećana za 10%
% Parabolična raspodjela širine lopatice

```

```

l_corrected = l_max * (1 - ((r - r_max_width) / (R -
r_max_width)).^2);
l_corrected(l_corrected < min(l)) = min(l);

```



Slika 6.6. Distribucija širine lopatice

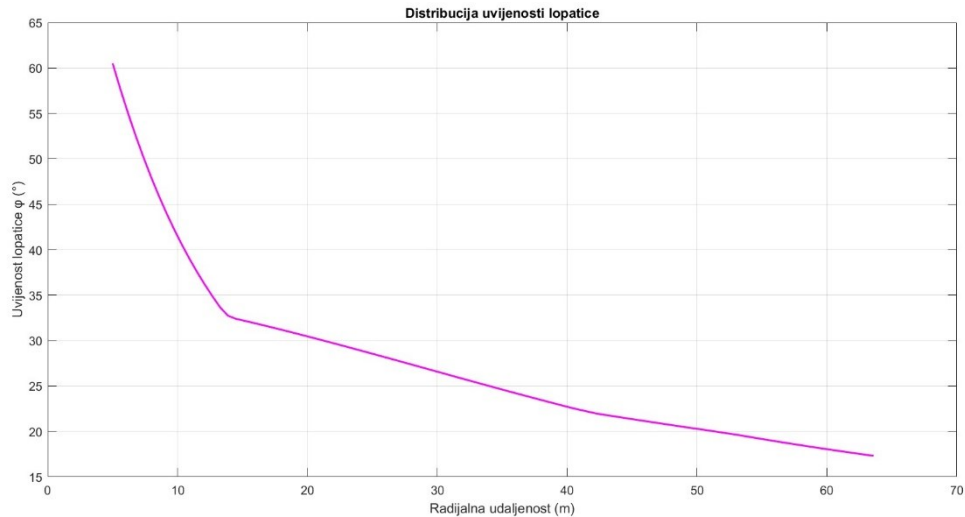
Plava krivulja sa slike 6.6. prikazuje realističan profil lopatice. Širina lopatice se povećava od rotora do maksimalne vrijednosti na srednjem dijelu polumjera, a zatim opada prema vrhu kako bi se smanjili otpor i vibracije. Korištena parabolična raspodjela bolje odgovara aerodinamičkim i strukturnim zahtjevima lopatice. U izradi programa uzeto je u obzir modeliranje optimalnog kuta u ovisnosti o radijalnoj udaljenosti s početkom od 5 m jer se prvih nekoliko metara lopatice uzima za konstrukcijsku stabilnost i spajanje na glavčinu rotora. Također, prvih par metara lopatice nema aerodinamički profil te ne generira korisni uzgon.

6.5.1. Kut uvijenosti ϕ

Kut uvijenosti ϕ izračunava se unutar iteracijske petlje prema formuli:

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{1 - a_1}{(1 + a_2)\lambda_r} \right) \quad (6.23)$$

Kada je lopatica bliže središtu rotora, brzina vjetra je relativno niža pa je potrebno veće uvijanje lopatice kako bi se osigurao optimalan kut napada. Iz slike 6.7. može se zaključiti da krivulja prikazuje smanjenje uvijenosti s povećanjem radijalne udaljenosti zbog povećane brzine rotacije.



Slika 6.7. Uvijenost lopatice

Kut uvijenosti mora ostati pozitivan na vrhu lopatice kako bi se osigurao pravilan rad turbine. Iako se smanjuje od korijena prema vrhu, ne smije pasti na nulu jer bi imalo negativan učinak na aerodinamičku učinkovitost turbine.

6.6. Snaga turbine

Ovaj kod simulira način na koji vjetroturbina proizvodi snagu ovisno o brzini vjetera, uključujući efekt samoregulacije koji će isključiti turbinu pri velikoj brzini vjetera:

```

%% Izračun snage turbine s efektom samoregulacije*
v_min = 4; % Minimalna brzina rada turbine (m/s)
v_max = 25; % Maksimalna brzina prije isključenja (m/s)

% Izračun brzine pri kojoj turbina postiže nazivnu snagu
v_nazivna = ((2 * P_s) / (rho * C_p * eta_m * eta_s * pi *
R^2))^(1/3);
fprintf('Brzina pri kojoj turbina postiže nazivnu snagu: %.2f
m/s\n', v_nazivna);

P_Q = zeros(size(v)); % Snaga

for j = 1:length(v)
    if v(j) < v_min
        % Turbina ne radi ispod minimalne brzine

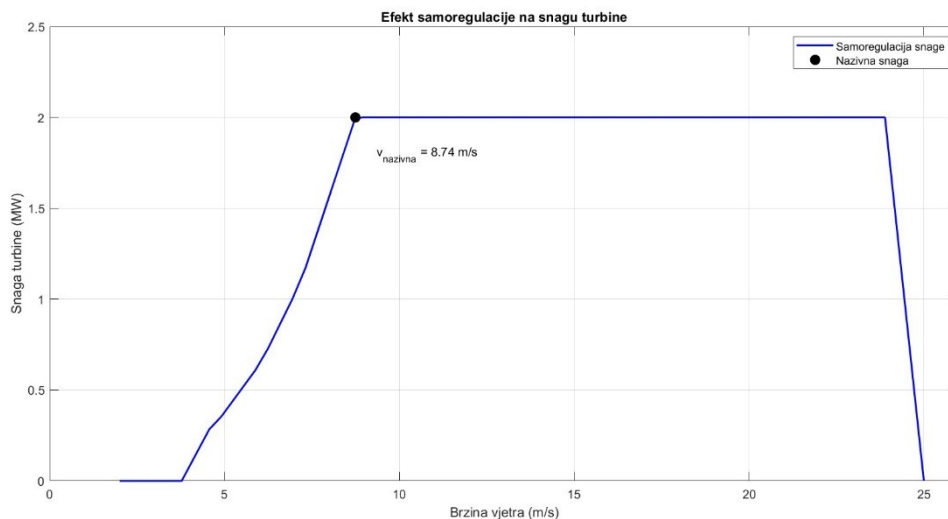
```

```

P_Q(j) = 0;
elseif v(j) < v_nazivna
    % Snaga raste kubno do nazivnog režima
    P_Q(j) = 0.5 * rho * C_p * eta_m * eta_s * pi * R^2 *
v(j)^3;
elseif v(j) >= v_nazivna && v(j) < v_max
    P_Q(j) = P_s;
else
    P_Q(j) = 0;% Isključenje turbine iznad 25 m/s
end
end
end

```

U vektor (P_Q) pohranjuju se snage turbine za svaku vrijednost brzine vjetra koja je prethodno nasumično generirana Weibullovom distribucijom. Nazivna brzina je ona brzina pri kojoj turbina postiže svoju nazivnu snagu i određuje prijelaz između kubnog rasta snage i konstantne snage. Proračunom u MATLAB-u, nazivna brzina vjetra iznosi 8.74 m/s.



Slika 6.8. Krivulja snage vjetroturbine s efektom samoregulacije

Na slici 6.8. može se uočiti da za vrijednost brzina manjih od 4 m/s, vjetroturbina ne proizvodi snagu. Ako je brzina vjetra između donje granice i nazivne brzine vjetra, snaga raste po kubnom zakonu. U području brzina između nazivne brzine vjetra i gornje granice, vjetroturbina radi maksimalnom snagom, ali približavanjem gornjoj granici vjetra počinje isključenje turbine u svrhu zaštite od oštećenja.

Zaključak

Vjetroelektrane su jedan od najbrže rastućih izvora obnovljive energije zbog ekoloških i ekonomskih prednosti. Kao obnovljivi izvor energije omogućuju smanjenje emisije stakleničkih plinova, smanjenje ovisnosti o fosilnim gorivima i dugoročnu isplativost čime je porasla potreba za proizvodnjom i instalacijom vjetragregata.

Dizajn i konstrukcija vjetroturbina vrlo je složen proces jer se mora postići aerodinamička učinkovitost koja ovisi o mnogim parametrima. Glavni cilj optimizacije lopatica je postići maksimalan koeficijent snage postavljanjem optimalnog kuta napada α prema relativnoj brzini strujanja zraka. Također, potrebno je osigurati aerodinamički profil lopatice koji se postiže optimalnim omjerom uzgona i otpora.

Numeričkim modelom vjetroturbine kojim je potrebno osigurati ravnomjernu raspodjelu opterećenja i optimalnu aerodinamičku iskoristivost duž cijele dužine lopatice, izračunati su ključni optimalni parametri dizajna vjetroturbine na temelju odabranih ulaznih podataka. Korištenjem Weibullove distribucije brzine vjetra predočena je realna raspodjela brzina vjetra i njihova varijabilnost uz pripadajuće vremenske intervale. Izračunata srednja energetska brzina vjetra iz Weibullove distribucije brzine vjetra nalazi se u tipičnim granicama intervala. Rješavanjem diferencijalnih jednadžbi aerodinamičkih sila na lopaticu i matematičkim aproksimacijama koeficijenata uzgona i otpora računaju se induksijski faktori unutar iteracijskog algoritma. Koristi se interpolacija koeficijenata iz tablica profila lopatica u ovisnosti o napadnom kutu α . Unatoč korištenju glatke interpolacije za stabilizaciju procesa javile su se numeričke nestabilnosti kod iterativnog algoritma zbog malih vrijednosti parametara induksijskih faktora što je utjecalo na računanje daljnjih parametara lopatice u ovisnosti o induksijskim faktorima. Iterativan algoritam uzrokuje visoki optimalan kut pri samom rotoru, ali pri nazivnoj brzini njegova vrijednost iznosi 14.29° što pripada teorijskim granicama optimalnog kuta α koje se kreću od 10° do 20° . Rješavanje problema konvergencije te bolja aproksimacija koeficijenata uzgona i otpora prikazali bi očekivano ponašanje induksijskih faktora.

U modelu se računala i snaga vjetroturbine u ovisnosti o brzini vjetra generiranom Weibullovom distribucijom. Prikazan je efekt samoregulacije snage vjetroturbine koji je ključan za zaštitu same turbine od oštećenja te za optimiziranu proizvodnju električne energije.

Literatura

- [1] Bak, C., Zahle, F., et al. *Description of the DTU 10MW Reference Wind Turbine*. Technical University of Denmark, 2013.
- [2] National Advisory Committee for Aeronautics (NACA). *The characteristics of 78 related airfoil sections from tests in the variable-density wind tunnel*. (Report No. 460). Washington, DC: U.S. Government Printing Office, 1950.
- [3] Delft University of Technology (TU Delft). *DU Airfoil Family for Wind Turbines*. TU Delft, 1999.
- [4] Pilić Rabadan, L. *Hydroenergetska i aeroenergetska postrojenja*. Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Splitu, 2015.
- [5] Manwell, J. F., McGowan, J. G., Rogers, A. L. *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*. 2. izdanje. Wiley, 2009.
- [6] Schubel, P. J., Crossle, R. J. *Wind Turbine Blade Design*
- [7] Özlük, F. *Wind Turbine Blade Design*
- [8] Yaramasu, V., Wu, B. *Model Predictive Control of Wind Energy Conversion Systems*.
- [9] Ragheb, M. *Wind Energy Conversion Theory, Betz Equation*.
- [10] Shepherd, W., Zhang, L. *Electricity Generation Using Wind Power*.
- [11] MathWorks. *MATLAB Documentation*. Dostupno na: <https://www.mathworks.com/help/matlab/>

Sažetak

Dizajn i regulacija vjetroturbina

Dizajn vjetroturbina je složen proces dimenzioniranja optimalnih parametara vjetroturbine za izabranu lokaciju te kreće od računanja srednje energetske brzine. Proces obuhvaća računanje matematičke aproksimacije sila uzgona i otpora koje djeluju na aerodinamički profil lopatice te indukcijskih faktora koji se javljaju pri strujanju zraka. Odabirom ulaznih parametara određuju se polumjer lopatice vjetroturbine te koeficijent brzohodnosti koji utječu na izbor turbine. Optimalni kut lopatice računa se kako bi se postigla maksimalna učinkovitost pretvorbe energije vjetra u mehaničku energiju rotora. Dizajniranjem lopatice s varijabilnim uvijanjem oko svoje osi, postiže se optimalan kut duž cijelog polumjera. Optimalno dizajniranje lopatice uzrokuje ravnomjernu raspodjelu aerodinamičkih sila, smanjuje opterećenja te poboljšava učinkovitost turbine. Pravilnom regulacijom snage vjetroturbine osigurava se učinkovit i stabilan rad vjetroturbine u svim vremenskim uvjetima.

Ključne riječi: vjetar; vjetroturbine; aeroprofil; optimalni kut; snaga vjetroturbine; regulacija snage

Summary

Design and regulation of wind turbines

The design of wind turbines is a complex process of sizing the optimal parameters of the wind turbine for a selected location, starting with the calculation of the mean energetic wind speed. The process includes the calculation of the mathematical approximation of lift and drag forces acting on the aerodynamic profile of the blade, as well as the induction factors that arise during airflow. By selecting input parameters, the blade radius of the wind turbine and the tip-speed ratio coefficient, which influence the choice of the turbine, are determined. The optimal blade angle is calculated to achieve maximum efficiency in converting wind energy into mechanical rotor energy. By designing the blade with variable twisting around its axis, an optimal angle is achieved along the entire radius. Optimal blade design ensures an even distribution of aerodynamic forces, reduces loads, and improves turbine efficiency. Proper power regulation of the wind turbine ensures efficient and stable operation of the wind turbine in all weather conditions.

Keywords: wind; wind turbines; airfoil; optimal angle; wind turbine power; power regulation