



Proizvodnja električne energije u vjetroelektranama



www.esf.hr



Projekt je sufinancirala Europska unija iz Europskog socijalnog fonda.



Sadržaj

1. Uvod	4
1.1. Uvodne napomene	4
1.2. Povijesni razvoj	11
2. Vjetar	21
2.1. Što je vjetar	21
2.2. Površinski vjetrovi	22
2.3. Lokalni "kompenzacijski" vjetrovi	24
2.4. Prepreke na tlu	26
2.5. Mjerenje brzine vjetra	27
2.6. Proračun izdvojene energije	28
3. Elementi vjetroturbine	30
3.1. Rotor	31
3.2. Lopatice	32
3.3. Glavčina	34
3.4. Pogonska linija	35
3.5. Kočioni sustav	36
3.6. Prijenosnik snage	36
3.7. Generator	37
3.8. Gondola	37
3.9. Zakretnik	37
3.10. Stup	38
3.11. Upravljački i nadzorni sustav	38
4. Dimenzioniranje vjetroturbina prema Betzu i Schmitzu	39
4.1. Koliko se snage može dobiti iz vjetra	39
4.2. Teorija aeroprofila	43
4.3. Uvjeti strujanja i aerodinamičke sile na rotirajuću lopaticu	47
4.3.1. Trokuti brzina	47
4.4. Aerodinamičke sile na rotirajuću lopaticu	48
4.5. Dimenzioniranje po Betzu	49
4.6. Gubitci	52
4.6.1. Profilni gubitci	52
4.6.2. Gubitci na vrhu	53
4.7. Schmitzova- teorija	55
4.7.1. Gubitci uslijed vrtloga	58
4.8. Konstruiranje vjetroturbina u praksi	59



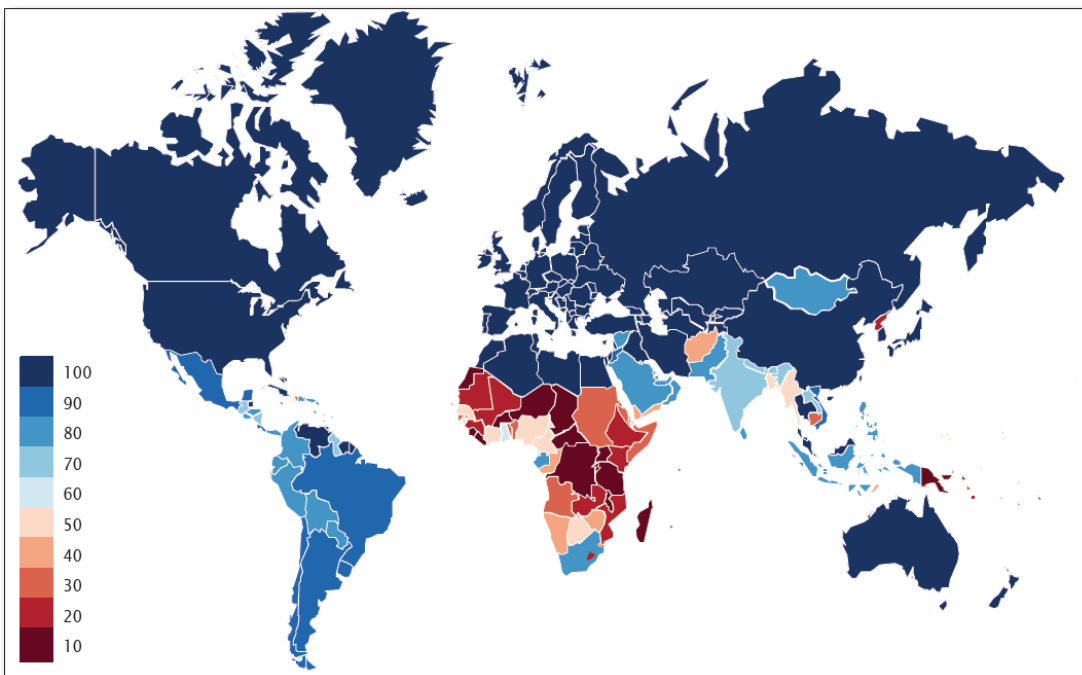
5. Sustav nadzora, zaštite i regulacija snage.....	60
5.1. Zaštita.....	62
5.2. Regulacija snage.....	63
Literatura.....	66
Kazalo slika.....	67
Kazalo tablica.....	70
Kazalo grafova.....	71
Popis ključnih pojmova.....	72
Impresum.....	73

1. Uvod

U povijesti industrijskog razvoja, zlatno doba "teške industrije" pripada davnoj prošlosti. Danas živimo u vremenu informatičkih tehnologija, u kojemu je stupanj tehnološkog razvoja ekstremno brz. Iako stope rasta kompjuterske industrije čine klasične industrije zastarjelima, danas postoji jedna suvremena elektro-strojogradnja, sa stopom rasta, kroz posljednja tri desetljeća, usporedivom s informatičkim sektorom, a to je gradnja vjetroelektrana.

1.1. Uvodne napomene

Energija je jedan od najkritičnijih gospodarskih, ekoloških i razvojnih problema s kojima se svijet danas suočava - oko 1,2 milijardi ljudi, što je oko 17% svjetske populacije, još uvijek nema pristup električnoj energiji (slika 1.).



Slika 1. Udio elektrifikacije u pojedinim zemljama u % [1]

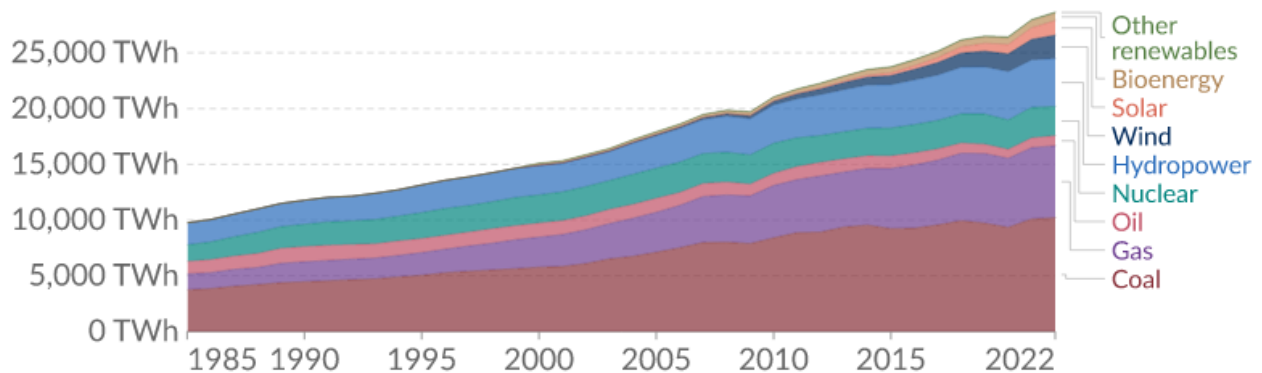
UN je prepoznao tzv. „čistu“ („zelenu“) energiju, i pristup njenom korištenju, ključnim faktorom za budući razvoj. Pristup čistoj energiji je sedmi cilj održivog razvoja (tzv. SDG), pa tako čista energija stoji uz bok ostalim ciljevima održivog razvoja, kao što su ublažavanje siromaštva, obrazovanje, poboljšanje okolišnih uvjeta i borba protiv klimatskih promjena.

Na kraju 2022. godine globalna potražnja za električnom energijom iznosila je preko 25 000 TWh (slika

2.). Većina ove energije dobivala se iz fosilnih i nuklearnih goriva (69,8%). Obnovljivi izvori energije (ne uzimajući u obzir hidroenergiju – 14,9%) imali su udio od 15,3%.

Electricity production by source, World

Our World in Data



Slika 2. Proizvodnja električne energije u svijetu u periodu od 1985. do 2022.godine iz različitih izvora [2]

Kako se potražnja za energijom (posebice električnom) u zadnjih 100 godina dramatično povećala, postalo je vrlo bitno razmotriti učinke koje proizvodnja električne energije ima na okoliš. U prošlosti je „moderan“ način života podrazumijevao povećanu potrošnju energije. Današnje studije, provedene u visokorazvijenim zemljama, pokazuju da se životni standard može povećati neovisno o povećanju potrošnje energije, ukoliko se uvedu odgovarajuće mjere učinkovitosti.

Porast potražnje električne energije značajno je utjecao na predviđanja vezana za svjetsko tržište energije. Prema statistikama je vidljivo da je u zemljama s rastućom populacijom i ekonomijom, potrošnja električne energije enormno rasla. No, visokorazvijene zemlje su počele ograničavati potrošnju energije bez utjecaja na životni standard, promovirajući učinkovitost novih tehnologija za proizvodnju energije [1].

Pri zadovoljenju rastućih potreba za energijom, nužno je uzeti u obzir i učinke koje različite tehnologije proizvodnje energije imaju na okoliš (tablica 1.).

Izvor energije	CO ₂ [g/kWh]	SO ₂ [g/kWh]	NO _x [g/kWh]	pepeo [g/kWh]	nuklearni otpad [mg/kWh]	
fosilna goriva	ugljen (s filterom)	977 ¹⁾ (977)	5-9 (0.8) ¹⁾	3-6 (0.8) ¹⁾	25 ²⁾ (0.1) ¹⁾	-
	mazut (s filterom)	730 (730)	1-4.2 ³⁾ -12 (0.8) ¹⁾	2-5 ⁴⁾ (0.8)	(0.1)	-
	plin (s filterom)	419 ¹⁾ (419)	0.05 (0.01) ¹⁾	2-4 ⁴⁾ (0.7) ¹⁾	(0.01) ¹⁾	-
	nuklearni otpad	-	-	-	-	4

Tablica 1. Usporedba učinaka koje pojedina fosilna i ostala goriva imaju na okoliš [3].

Vrijednosti u zgradama postižu se ugradnjom modernih filtera: ¹⁾ DEWI; ²⁾ Strau; ³⁾ odnosi se na 1% sumpora u mazutu; ⁴⁾ Heitmann [3].

Kontinuirano korištenje konvencionalnih tehnologija pridonosi daljnjem globalnom zatopljenju i za krajnju bi posljedicu moglo imati klimatsku katastrofu.

Povećano korištenje energije vjetra, vode i sunca, povećat će šanse da do te katastrofe ne dođe, budući da kod obnovljivih izvora energije nema emisije stakleničkih plinova niti nuklearnog otpada. Nadalje, za tehnologiju proizvodnje električne energije iz energije vjetra nije potreban velik zemljišni prostor, što je postalo vrlo bitno pitanje u sve naseljenijim zemljama sjeverne Europe (tablica 2.).

	Lokacija	Podaci	Iskorištenost zemljišta
Hydroenergija	Itaipu, 1985. (Brazil)	12 600 MW H = 200m	6 W/m ²
	Spiez, 1986. (Švicarska)	23MW H = 65m	70 W/m ² (po m ² poplavljenog zemljišta)
Postrojenja na smeđi ugljen (lignit)	Schkopau, 1996. (Njemačka)	1000 MW	8 W/m ²
	Schwarze Pumpe, 1998.	1600 MW	16 W/m ²
	Buschhaus, 1985. (Njemačka)	380 MW	31 W/m ² (po m ² rudarskog zemljišta)
Vjetroelektrane	Njemačka	V _{vjetra} = 4,5-6 m/s	50-120 W/m ² (po m ² površine rotora) površina temelja je 10 puta manja

Tablica 2. Količina proizvedene energije po m² korištenog zemljišta [3]

Osim već navedene prednosti, neemitiranja stakleničkih plinova, još jedna prednost obnovljivih izvora energije je to što su u periodu od samo nekoliko mjeseci u mogućnosti proizvesti dovoljno energije da vrate ukupnu količinu energije utrošenu za njihovu izgradnju, i ostvare tzv. energetska amortizaciju (tablica 3).

	Vjetar			Sunce			Voda		
energetska amortizacija (mjeseci)	4.5 m/s	5.5 m/s	6.5 m/s	mono	multi	amorfni	velike	male	mikro
	6-20	4-13	2-8	72-93	58-74	51-66	5-6	8-9	9-11

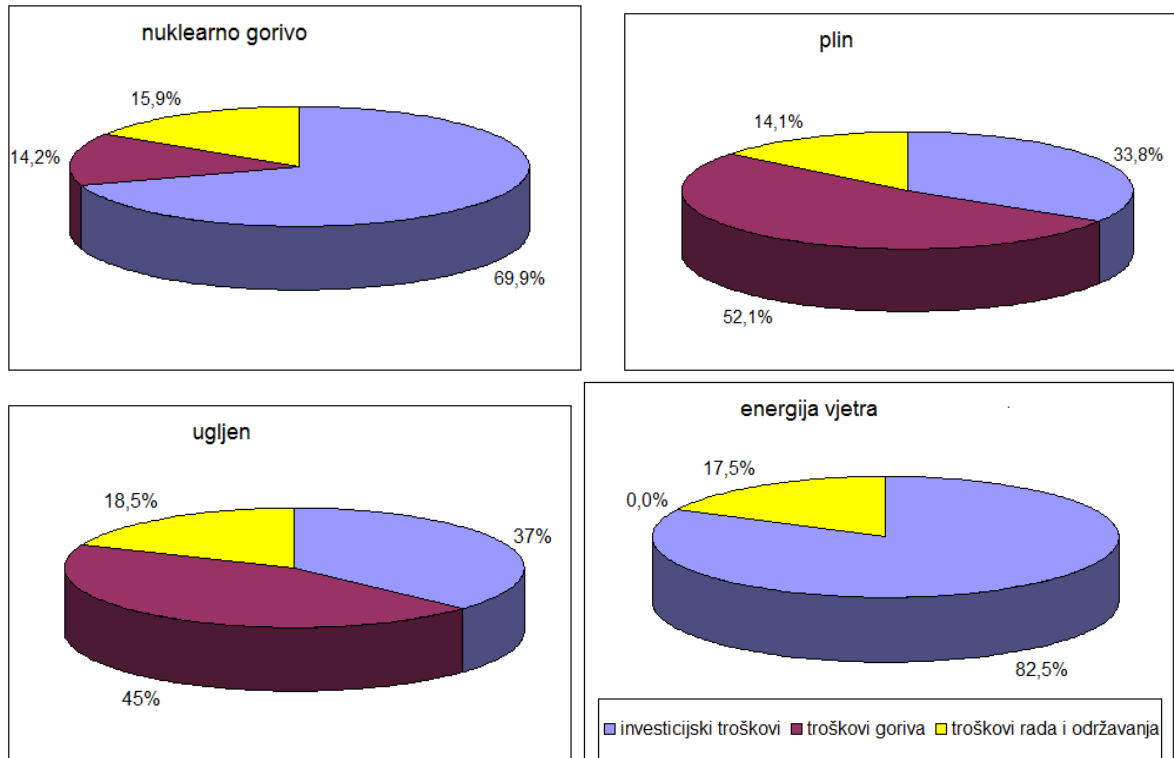
Tablica 3. Energetska amortizacija različitih obnovljivih izvora energije [3]

Troškove proizvodnje električne energije čine tri osnovne kategorije:

1. investicijski troškovi – ukupna investicija uključujući trenutno stanje na tržištu (kamatna stopa, period vraćanja kredita)
2. troškovi goriva

3. troškovi rada i održavanja

Na slici 3. su prikazani udjeli pojedinih troškova u cijeni električne energije dobivene iz različitih izvora.

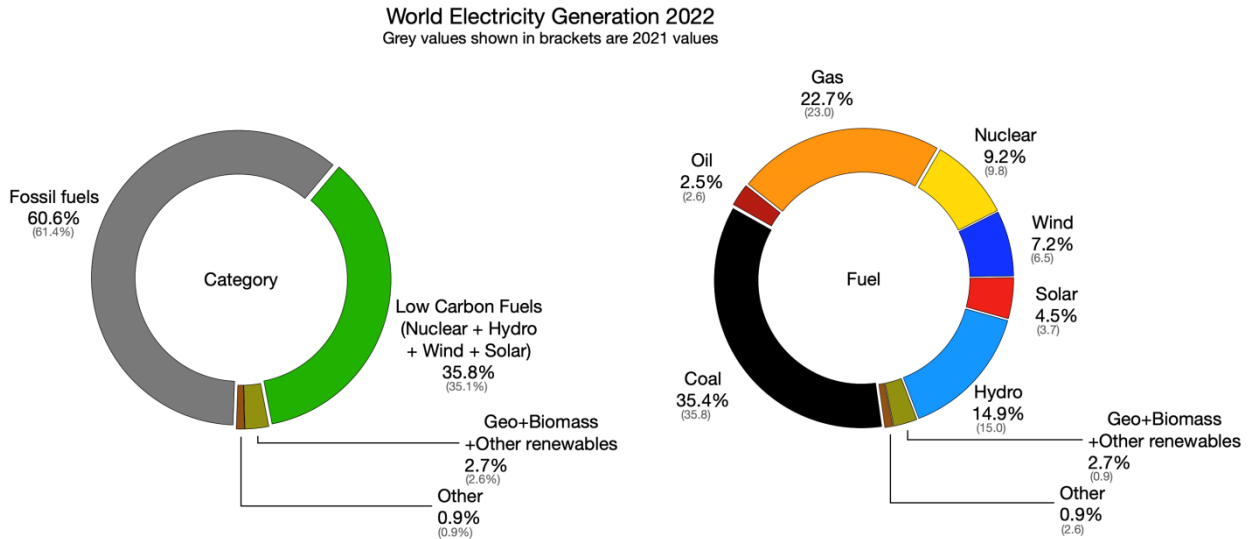


Slika 3. Udjeli pojedinih troškova u cijeni električne energije dobivene iz različitih izvora [3]

Iako su investicijski troškovi za postrojenja na fosilna goriva niži nego oni za nuklearna ili vjetroenergetska postrojenja, cijena fosilnih goriva na kraju je puno viša.

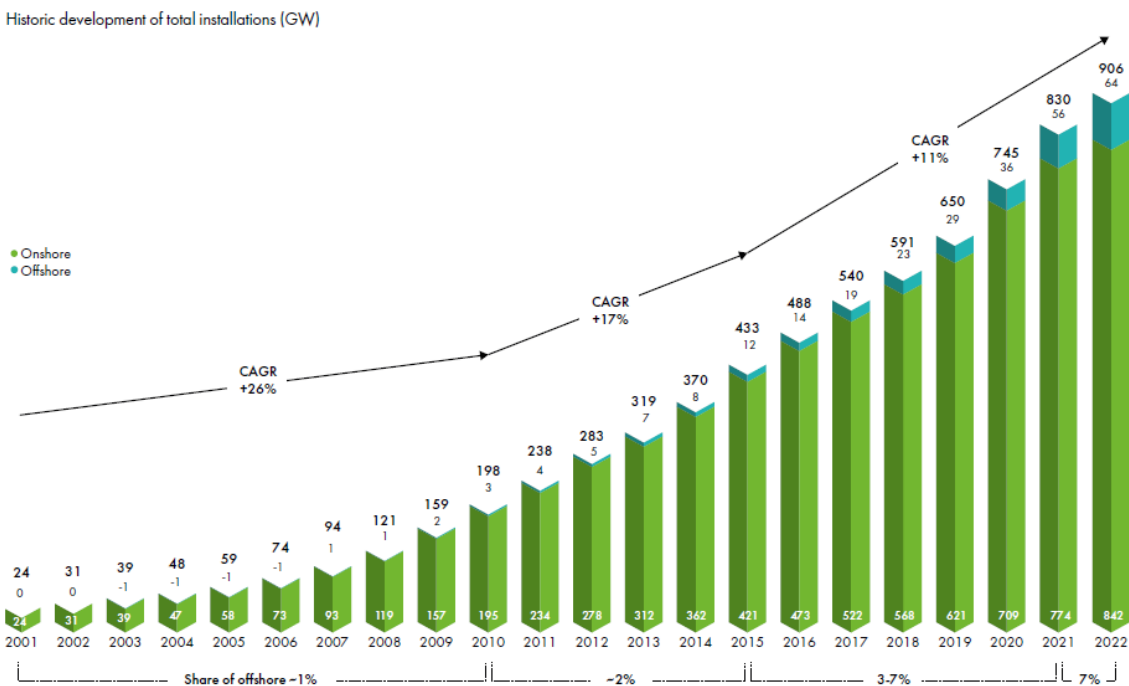
Kyoto Protokol iz Kyota predstavlja prvi pokušaj ograničavanja emisije CO₂ kroz internacionalnu konvenciju. Na toj su konferenciji postavljene smjernice za ograničavanje emisije stakleničkih plinova, te predloženi prelasci na alternativne izvore energije. Energija vjetra i obnovljivi izvori energije pružaju mogućnost zadovoljavanja rastućih potreba za energijom bez ugrožavanja okoliša ili izazivanja klimatskih katastrofa.

Kako u zemljama u razvoju, tako i u razvijenim zemljama potreba za čistim i održivim izvorima energije postaje prijeko potrebna, zbog sve izraženijih posljedica klimatskih promjena. Istodobno, geopolitička i ekonomska neizvjesnost oko tradicionalnih tržišta fosilnih goriva naglašava važnost energetske diversifikacije i neovisnosti. Na globalnoj razini je energija vjetra najrašireniji oblik obnovljive energije, s preko 7,2% udjela u svjetskoj proizvodnji električne energije u 2022. godini (slika 4.) [4].



Slika 4. Globalni udjeli pojedinih izvora energije (fosilnih i obnovljivih) u svjetskoj proizvodnji električne energije u 2022. godini [4]

Iz slike 5. je vidljivo da se porast u svijetu u instaliranoj snazi vjetroelektrana u zadnjih 10 godina povećao više od tri puta.



Slika 5. Povijesni razvoj instalirane snage vjetroelektrana u GW u svijetu [5]

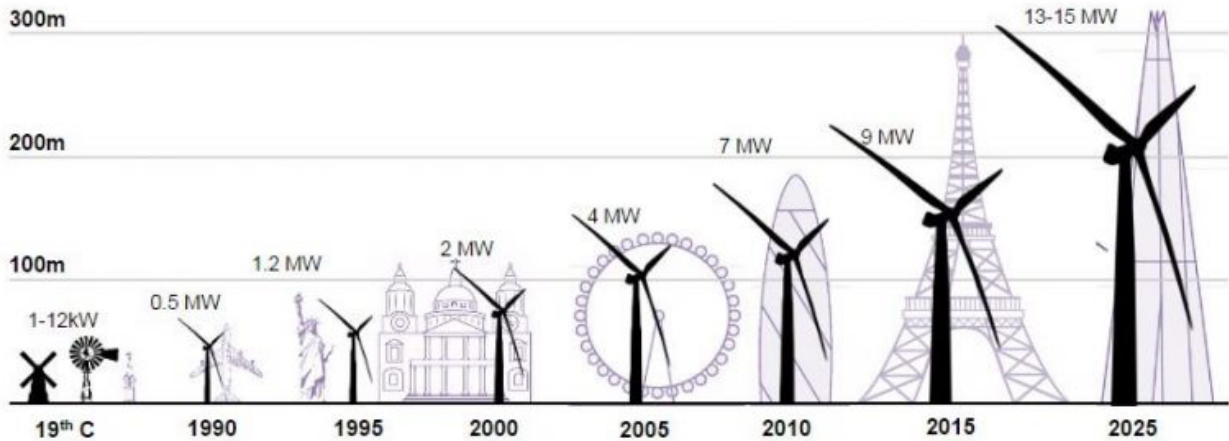
Danas su u Hrvatskoj od ukupno 24 vjetroelektrane u radu 22, a 2 su u probnom radu (lipanj 2021.). Vjetroelektrane isporučuju električnu.....energiju u elektroenergetski.....sustav Hrvatske. Instalirana snaga svih vjetroelektrana je 790 MW, u radu je 325 vjetroagregata, koji isporučuju godišnje

oko 1 788 GWh električne energije . Za usporedbu, Termoelektrana Plomin ima snagu 330 MW i isporučuje godišnje oko 2 173 GWh električne struje. Neke vjetroelektrane su prikazane na slici 6. [6].



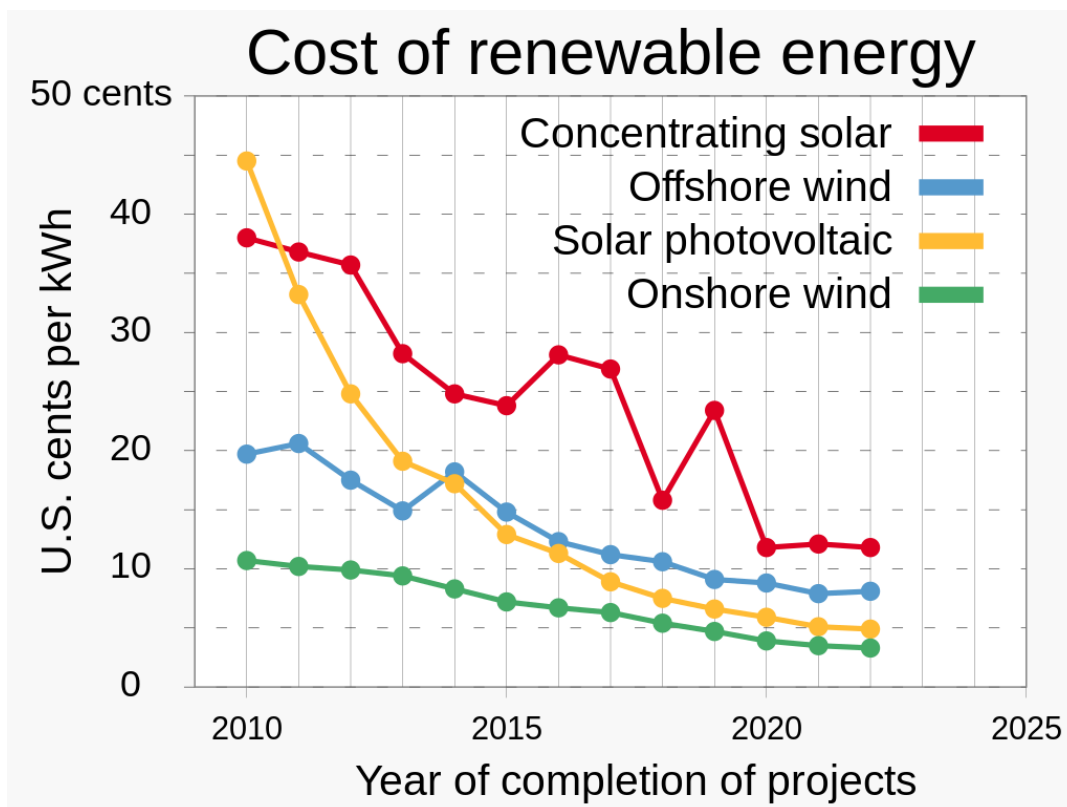
Slika 6. Neke od vjetroelektrana u Republici Hrvatskoj: Vrataruša - gore lijevo; Trtar-Krtolin - gore desno; Vrataruša - dolje lijevo [6]

Intenzivni porast veličine i jedinične snage komercijalno proizvedenih vjetroturbina između 1990. i 2025. godine je prikazan na slici 7. [7].



Slika 7. Razvoj veličine i jedinične snage komercijalno proizvedenih vjetroturbina između 1990. i 2025. [7]

Energija vjetra predstavlja ekološki potpuno zadovoljavajući izvor energije, tim više što se i cijena energije, zbog uznapredovale tehnologije proizvodnje vjetroelektrana, približava prihvatljivim vrijednostima.. Današnja cijena se kreće između 4 i 8 U.S. centa/kWh, zavisno o tome radi li se o „onshore“ odn. „offshore“ vjetroelektranama. Podaci o padu cijene električne energije dobivene iz vjetroelektrana u zadnjih desetak godina, kao i postrojenja sa solarnom energijom, prikazani su na slici 8.

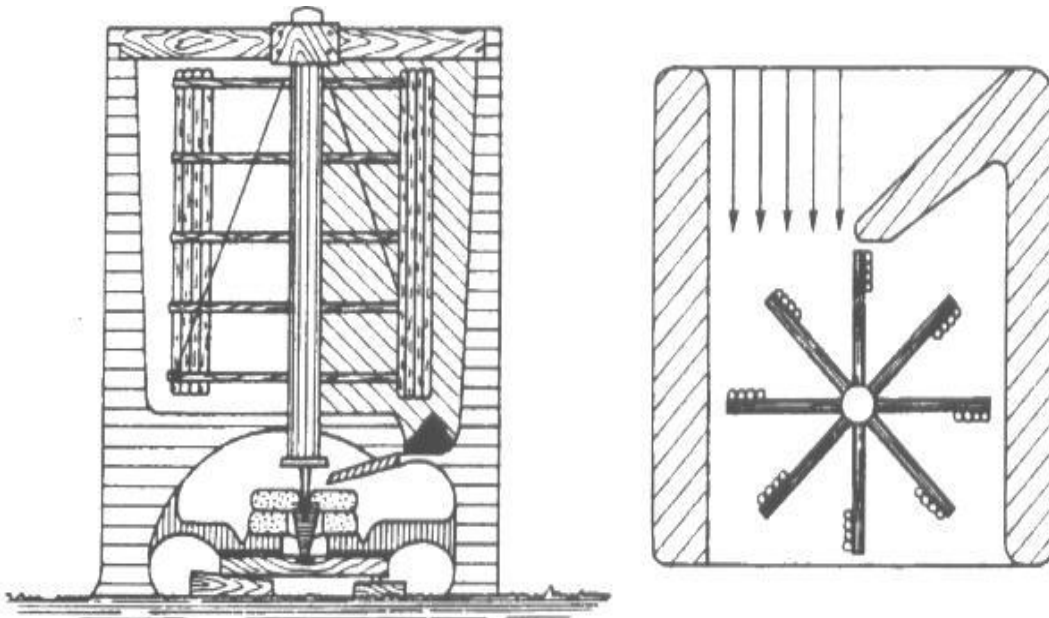


Slika 8. Pad cijene električne energije proizvedene u vjetroelektranama kao i u postrojenja na solarnu energiju u zadnjih desetak godina [4]

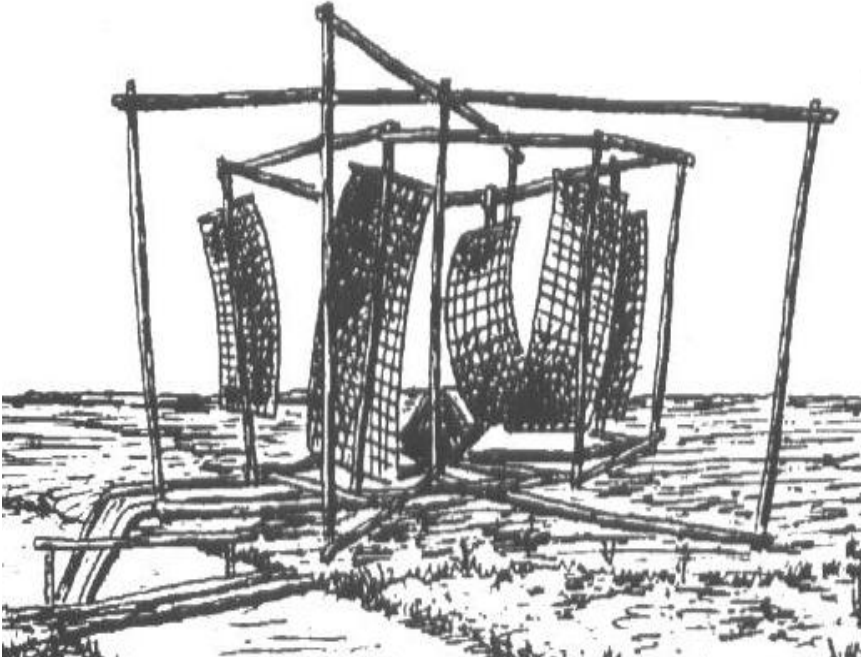
1.2. Povijesni razvoj

Korištenje energije vjetra nije sasvim nova tehnologija. Temelji se na dugoj tradiciji tehnologije vjetrenjača. Postoje kontradiktorna nagađanja o povijesti vjetrenjača. Neki autori tvrde da su otkrili ostatke kamenih vjetrenjača u Egiptu, blizu Aleksandrije, čija je starost navodno 3000 godina. Iako za to postoje naznake, ipak nema uvjerljivih dokaza da su Egipćani, Feničani, Grci ili Rimljani poznavali vjetrenjače.

Prvi pouzdani podatci o postojanju vjetrenjača potječu iz povijesnih izvora koji sežu do 644. godine nove ere. Govori se o vjetrenjačama iz perzijsko-afganistanske granične regije Seistan(slika 9.). Nekoliko stoljeća kasnije, u Europu su stigle prve vijesti o vjetrenjačama koje za navodnjavanje rižinih polja koriste Kinezi (slika 10.).



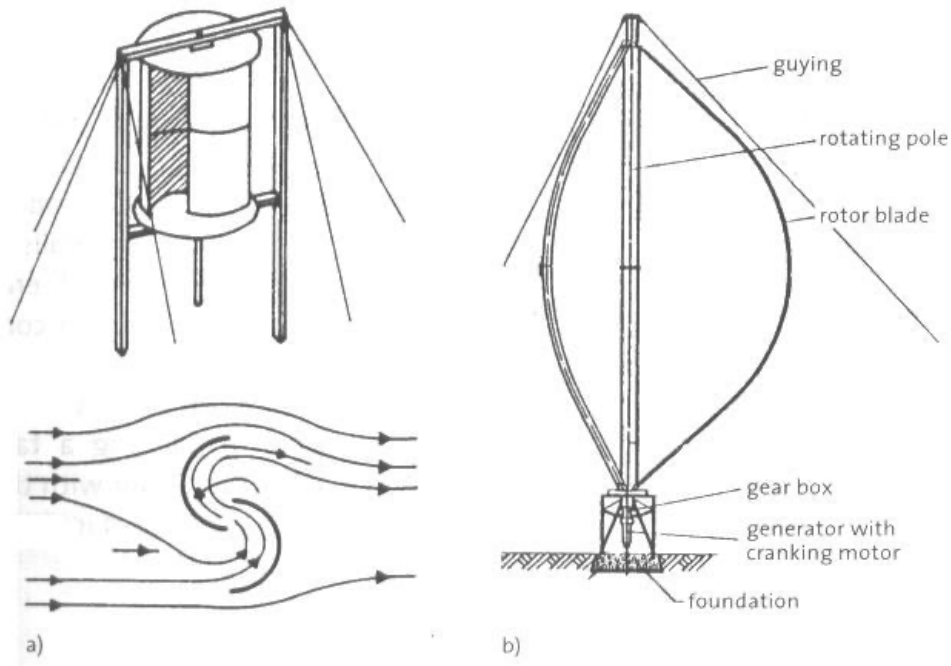
Slika 9. Perzijska vjetrenjača [3]



Slika 10. Kineska vjetrenjača s rotirajućim "jedrima" [3]

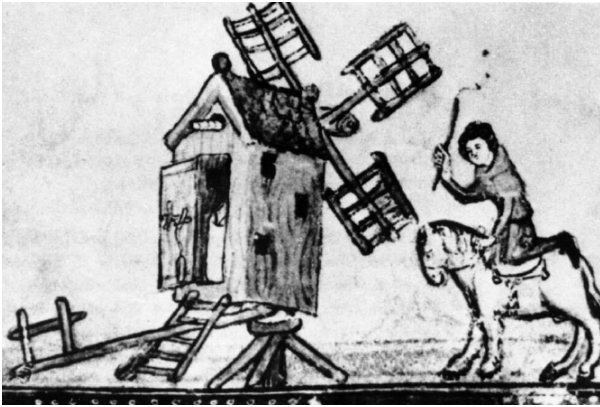
Najstarije svjetske vjetrenjače imale su vertikalnu os vrtnje i kao pogon su koristile silu otpora. Kod perzijskih vjetrenjača, prekrivanjem polovice rotora zidom, stvarana je asimetričnost (slika 9. – desno). Kineske vjetrenjače su bile u mogućnosti iskoristiti glavnu prednost vjetrenjača s vertikalnom osi vrtnje, a to je korištenje energije vjetra bez obzira na njegov smjer.

Jednostavnost konstrukcije vjetrenjača s vertikalnom osi vrtnje značajna je za Savoniusov rotor iz 1924. god. (slika 11.a) te Darriesov rotor iz 1929. god. (slika 11.b), kao i za kasnije "zapadne" verzije s vertikalnom osi vrtnje koje, djelomično ili isključivo, koriste uzgon kao pogonsku silu.

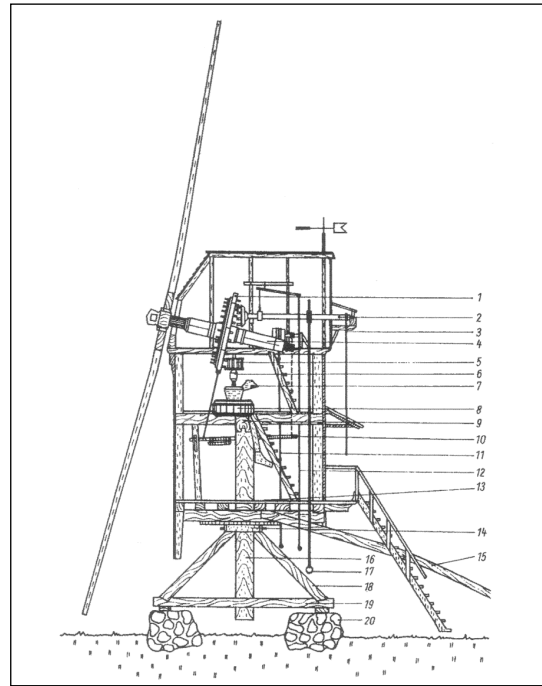


Slika 11. Savoniusov rotor (a) i Darriesov rotor (b) [3]

Na Zapadu je puno kasnije razvijen tip vjetrenjača s horizontalnom osi vrtnje, različit od onoga razvijenog na Orijentu. Najznačajnija karakteristika tih vjetrenjača je rotor s horizontalnom osi, čije lopatice rotiraju u ravnini okomitoj na smjer strujanja vjetra, a pogonska sila je sila uzgona. Najstarija konstrukcija uzgonskom silom pokretanog uređaja s horizontalnom osi vrtnje je stupna vjetrenjača. Njena slika je pronađena u knjigama za molitvu u Engleskoj, a potječe iz 1100. god. (slika 12). Istodobno je pronađen pisani zapis i u pravnim dokumentima francuskog grada Arlesa (u regiji Provence na jugoistoku Francuske).



Slika 12. Crtež stupne vjetrenjače iz Engleske u knjizi za molitve iz 12. stoljeća [3]



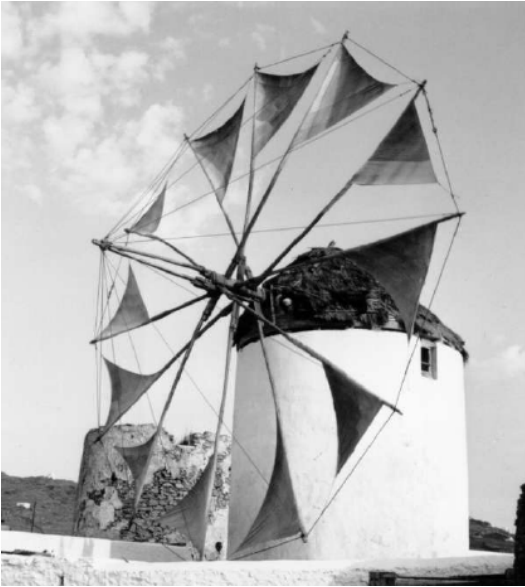
Slika 13. Paltrockova vjetrenjača – mlin, najpoznatija u Nizozemskoj u 16. i 17. stoljeću [3]

Višekatne vjetrenjače s galerijima prepoznatljive su kao osnovni tip nizozemskih vjetrenjača. Takva je i Paltrockova vjetrenjača na slici 13. S desetcima tisuća sagrađenih nizozemskih vjetrenjača, upotreba energije vjetra doživljava svoj vrhunac u Nizozemskoj u 17. i 18. stoljeću (slika 14). Velik broj vjetrenjača doveo je do standardizacije njihove konstrukcije, što je neobično za to doba.



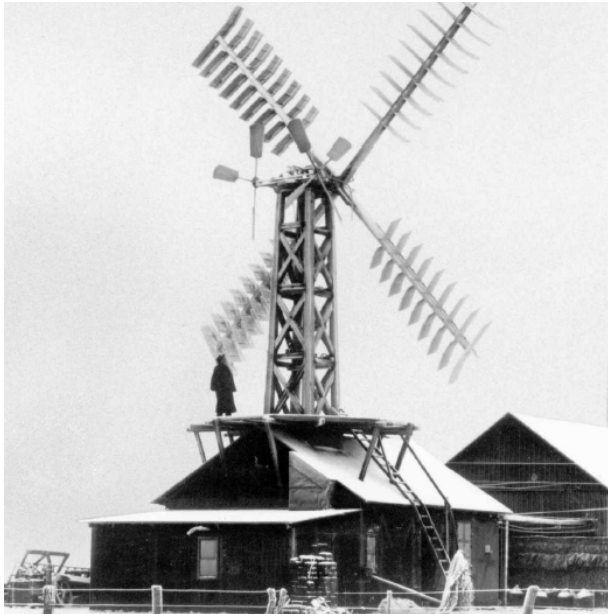
Slika 14. Vjetrenjače parka Zaanse Schans (Nizozemska) imaju različite namjene: De Zoeker je uljara, De Kat bojadisaona, a De Gekroonde Poelenburg je pilana [3]

U južnoj Europi, na Mediteranu, stupne vjetrenjače nisu stekle popularnost, Tamo je bila rasprostranjena drugačija vrsta mlina: vjetrenjačatoranj (slika 15.). Takav tip vjetrenjača se puno ranije koristio za navodnjavanje. Prvi dokumentirani trag o ovom tipu vjetrenjača datira iz 1200. godine



Slika 15. Mediteranska vjetrenjača-toranj s jedrima – rana verzija ovakvih vjetrenjača [3]

P. La Cour je bio prvi koji je na sistematski način koristio energiju vjetra za proizvodnju električne energije pomoću vjetrenjače (slika 16.). Zadnji tip povijesnih vjetrenjača je američka (tzv. farmerska) vjetrenjača (slika 17.), razvijena sredinom 19.stoljeća (****?).



Slika 16. P. La Courova vjetrenjača za proizvodnju električne energije [3]



Slika 17. Američka "farmerska" vjetrenjača za pumpanje vode [3]

S navedenim primjerima vjetrenjača završava njihova era, a započinje era vjetroturbina.

Slike 18. i 19. prikazuju vjetroturbine nastale sredinom 20. stoljeća prije energetske krize.



Slika 18. HÜTTEROVA turbina (100 kW; D= 34 m; NJEMAČKA 1958.) [3]



Slika 19. GEDSEROVA turbina (200 kW; D= 24 m; Danska 1957.) [3]

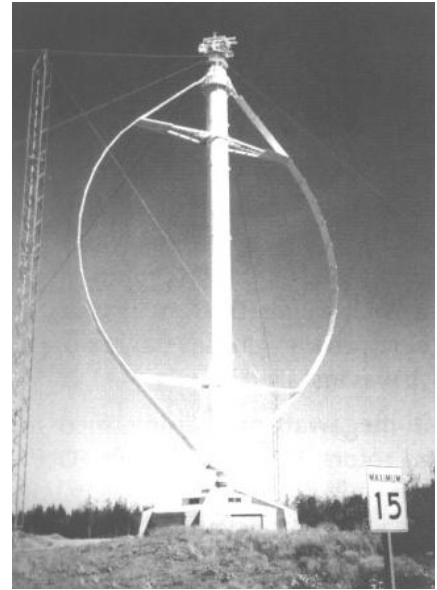
Nakon energetske krize počeo je razvoj modernih vjetroturbina prve generacije, (slike 20., 21. i 22.) i druge generacije (slike 23., 24. i 25.) .



Slika 20. GROWIAN (3000 kW; D= 100 m; NJEMAČKA 1982.) [3]



Slika 21. WTS-3 MAGLARP (3000 kW; D= 78 m; ŠVEDSKA 1982.) [3]



Slika 22. EOLE C (4200 kW; D= 64 m; KANADA 1988.) [3]



Slika 23. WKA (1200 kW; D= 60 m; NJEMAČKA 1990.) [3]



Slika 24. GAMMA 60 (1500 kW; D= 60 m; ITALIJA 1992.) [3]



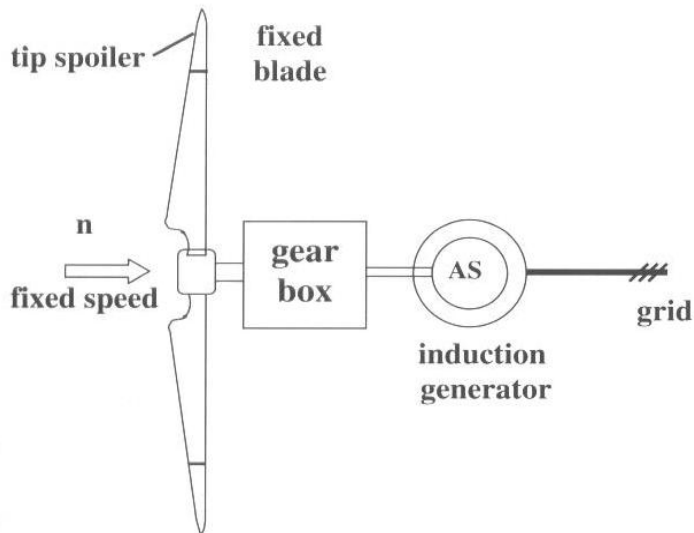
Slika 25. MONOPTEROS (640 kW; D= 56 m; NJEMAČKA 1989.) [3]

Kao što se može vidjeti na slikama, najviše su razvijane vjetroturbine s horizontalnom osi vrtnje, ali i one s vertikalnom, s tri, dvije ili jednom lopaticom .

„Danski koncept” postao je tehnički izraz među konstruktorima vjetroturbina. Označava relativno jednostavan, pouzdan i robustan princip konstrukcije koji je prikazan na slici 26.

Turbinu karakterizira:

- horizontalna os vrtnje rotora s tri lopatice koje su kruto pričvršćene na glavčinu;
- rotor radi s konstantnom brzinom vrtnje i pokreće asinkroni generator koji je spojen na električnu mrežu;
- za regulaciju izlazne snage koristi se efekt tzv. prekida strujanja ("stall"), a za kontrolu prekoračenja brzine vrtnje postoje mehaničke i aerodinamičke kočnice.

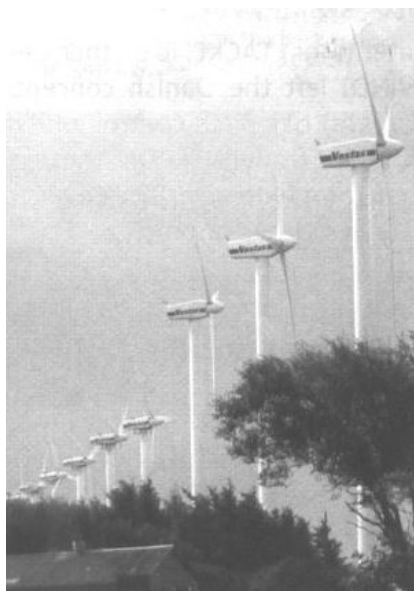


Slika 26. Vjetroturbina s asinkronim generatorom i konstantnom brzinom vrtnje (tzv. stall-controlled) [3]

Razvoj vjetroturbina proizvođača VESTAS -a prikazan je na slikama od 27. do 30.



Slika 27. VESTAS V15-55 (55 kW; D= 15 m) [8]



Slika 28. VESTAS V27-225 (225 kW; D= 27 m) [8]



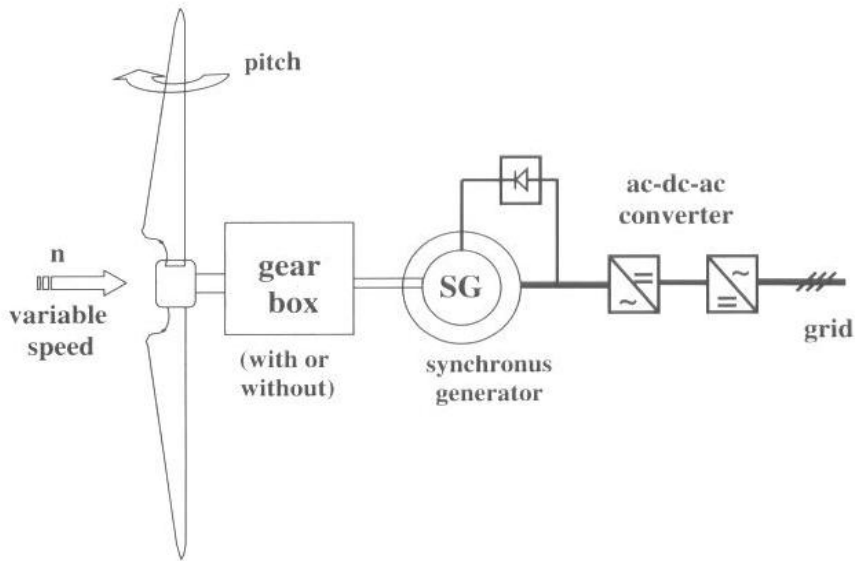
Slika 29. VESTAS (2000 kW; D= 52 m) [8]



Slika 30. VESTAS V110 (4200 kW; D= 150 m) [8]

ENERCON je njemačka kompanija koja je prva uspješno napustila danski princip i predstavila potpuno novi koncept (slika 31.) koji karakterizira:

- promjenjiva brzina vrtnje;
- rotor kontroliran promjenom koraka lopatice;
- direktno pogonjen sinkroni generator, bez reduktora;
- ac-dc-ac pretvorba za mrežni priključak.



Slika 31. Vjetroturbina sa sinkronim generatorom i promjenjivom brzinom vrtnje (tzv. pitch-controlled) [3]

Razvoj vjetroturbina proizvođača ENERCON- a prikazan je na slikama 32., 33. i 34.



Slika 32. N52 (1000 kW; D= 52 m; NJEMAČKA 1995.) [9]

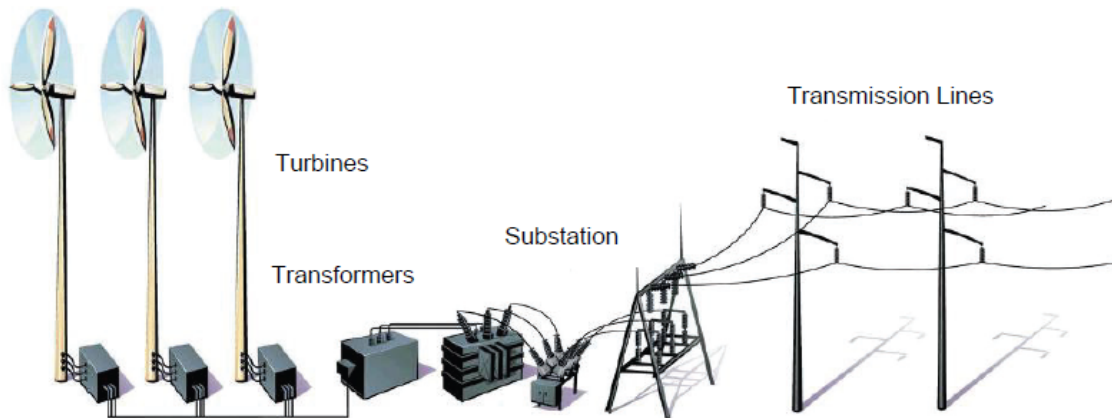


Slika 33. N133/4.8 (4800 kW; D= 133.2 m) [9]



Slika 34. N163/6X (6000 kW; D= 163 m) [9]

Više vjetroturbina povezanih na mrežu za prijenos električne energije čini vjetroelektranu, (slika 35.), koja može biti instalirana na kopnu, („on-shore“), slika 29., ili na moru, u plitkoj vodi uz obalu („off-shore“), slika 30.



Slika 35. Shematski prikaz vjetroelektrane [3]

2. Vjetar

Kako bi se dobila potpuna slika o vjetroturbinama, u ovom poglavlju će biti navedene osnovne činjenice o vjetru i njegovu potencijalu.

Nastrujavajući na lopatice, vjetar stavlja u vrtnju rotor vjetroturbine. Rotirajuće lopatice preko vratila prenose okretni moment na generator, na čijim se namotima inducira napon. Količina proizvedene energije ovisi o brzini vjetra i veličini lopatica. Udvostručenjem brzine vjetra količina proizvedene energije se poveća osam puta, dok se udvostručenjem promjera rotora količina proizvedene energije poveća četiri puta.

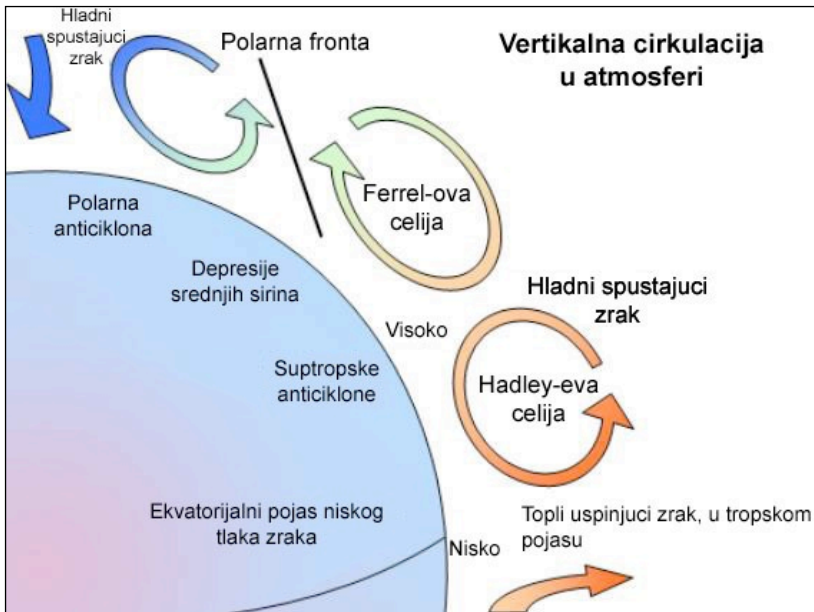
2.1. Što je vjetar

Vjetar je zrak u gibanju. Nastaje kao posljedica nejednolikog zagrijavanja zemljine površine. Zemljinu površinu čine različita tla, te vodene površine koje nejednoliko upijaju sunčevo zračenje. Zrak iznad kopna zagrijava se brže od zraka iznad vode. Topli zrak iznad kopna ekspandira i struji u više slojeve atmosfere, a hladniji zrak, koji se do tog trenutka nalazio iznad vode, struji na njegovo mjesto, stvarajući tako lokalne vjetrove. Po noći je situacija obrnuta, jer se zrak iznad kopna hladi brže od zraka iznad vode. Strujanje zraka je, stoga, posljedica pretvorbe toplinske energije u kinetičku.

Slično ovome, atmosferski vjetrovi nastaju kao posljedica činjenice da se zrak u području ekvatora više zagrijava od zraka iznad Zemljinih polova.

Postoje dvije glavne globalne zračne struje: Rossbyjeva i Hadleyeva (slike 36. i 37.). Rossbyjevazračna struja javlja se između 30° i 70° SZŠ, te između 30° i 70° JZŠ.

Ta struja pomiče topliji zrak prema Zemljinim polovima, a hladniji zrak prema suptropskim područjima [2].



*** (u slici: spuštajući, širina,

Hadleyeva ćelija, uspinjući zrak)

Slika 36. Rossbyjeva zračna struja [3]

Hadleyeva zračna struja se javlja između 30° SZŠ i 30° JZŠ. Ona pomiče vlažni i topli zrak tropskih područja. Zbog otklona, koji nastaje kao posljedica Zemljine vrtnje, ova zračna struja rezultira konstantnim vjetrovima [3].

*** Hadleyeve kape (u slici)

Slika 37. Hadleyeva zračna struja [3]

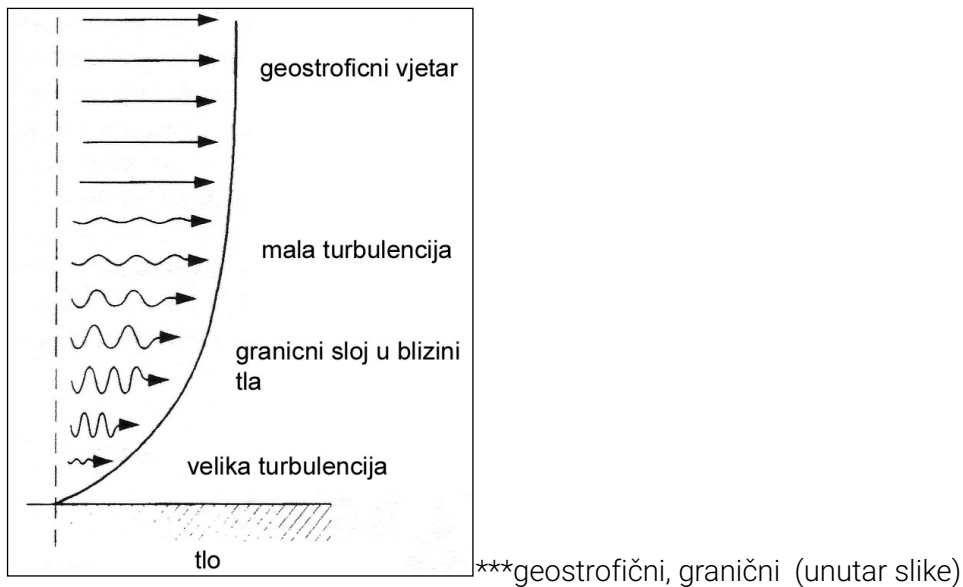
Još dvije vrlo značajne zračne struje koje nastaju kao posljedica razlike u globalnoj energiji su monsunaska i tropska struja, a one uvjetuju monsun i ciklone.

2.2. Površinski vjetrovi

Rossbyjeva i Hadleyeva zračna struja nisu vjetrovi koji se javljaju u blizini zemljine površine i ne bi se mogli iskoristiti za vjetro turbine. Prilikom susreta sa zemljinom površinom zračne mase gube na brzini, te tako dolazi do stvaranja površinskog graničnog sloja. Površinski vjetrovi imaju karakterističnu raspodjelu brzine (od nule do geostrofičnog vjetra). Debljina graničnog sloja može se kretati u granicama od deset do nekoliko stotina metara, zavisno o hrapavosti površine i polju temperature. Vjetro turbine uvijek rade i u području graničnog sloja.

Jasno je da je brzina vjetra na zemljinoj površini jednaka nuli. Stoga između sloja konstantne neporemećene struje vjetra i zemljine površine postoji velika promjena brzine vjetra.

Unutar graničnog sloja energija se iz visokoenergetskih slojeva neporemećene struje zraka prenosi na niže slojeve pa se s zato u blizini zemljine površine javlja turbulentno strujanje. U zavisnosti o hrapavosti zemljine površine stvara se vertikalni gradijent brzine (slika 38.). Definirana je i veličina z_0 ($z_0 \neq 0$) za koju je brzina vjetra jednaka nuli.

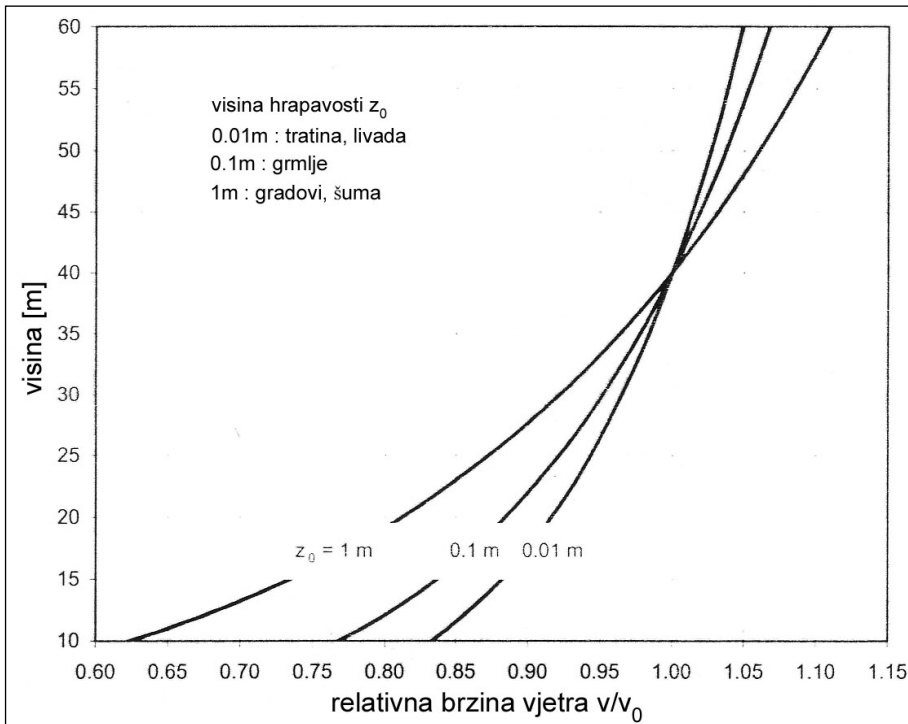


Slika 38. Granični sloj [3]

Smično naprezanje, koje se javlja između struje zraka (viskozni fluid) i tla, rezultira usporavanjem neporemećene struje zraka. Gradijent smičnog naprezanja, a samim time i vertikalni gradijent brzine, najveći je u blizini tla. Promjena brzine u turbulentnom graničnom sloju prema Prandtlu iznosi [1]:

$$v(z) = \frac{v^*}{k} \cdot \ln\left(\frac{h}{z_0}\right) \quad (2.1.)$$

gdje su: v^* - brzina trenja čije se vrijednosti kreću u granicama 0.1÷0.3 m/s; k – Karmanovakonstanta za granični sloj zračne struje, a iznosi 0.4; z_0 – visina hrapavosti koja ovisi o izgledu zemljine površine (slika 1.13)



Slika 39. Promjena brzine koja ovisi o udaljenosti od tla i visini hrapavosti [3]

Jednadžba (2.1) se može koristiti samo uz pretpostavku da je prijenos energije kroz slojeve konstantan. U stvarnosti je teško odrediti vrijednosti v^* i k pa je time upotreba jednadžbe (2.1) otežana. Stoga se vertikalne promjene brzine vjeta ne računaju direktno, već se računa promjena brzine relativno referentnoj visini h_1 i referentnoj brzini v_1 [1]:

$$v_2(h_2) = v_1 \cdot \frac{\ln\left(\frac{h_2}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_1}{z_0}\right)} \quad (2.2)$$

Ako je poznata brzina na određenoj visini, vertikalna raspodjela zavisi isključivo o visini hrapavosti z_0 . Upotreba jednadžbe (2.2) također je ograničena, jer stvarna vertikalna raspodjela dodatno ovisi o poljima temperature i tlaka.

2.3. Lokalni “kompenzacijski” vjetrovi

Razlika potencijala u atmosferi nije jedino što izaziva globalna gibanja zračnih masa. Razlika u količini zračenja također može izazvati lokalna gibanja zraka. Činjenica je da se to najviše događa zbog utjecaja zemljine površine. Rezultat su lokalni vjetrovi sa specifičnim obilježjima određenog područja.

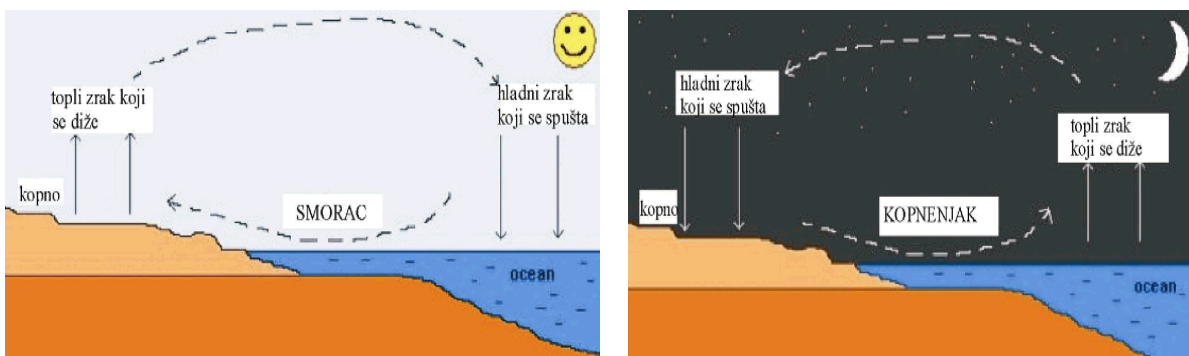
Najvažniji lokali vjetrovi su:

- priobalni vjetrovi,
- planinski vjetrovi

- katabatički vjetrovi.

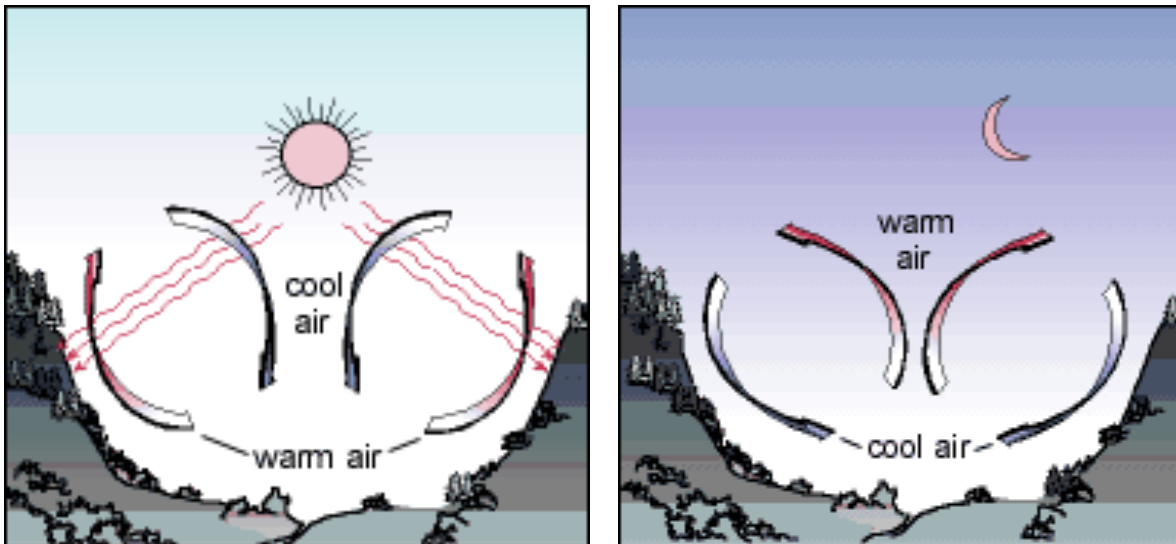
Ti su vjetrovi najčešće uzrokovani razlikama u temperaturi i strukturi zemljine površine (oroografiji).

Obalna područja se očituju po specifičnom strujanju temeljenom na razlici između temperatura zraka iznad mora i iznad kopna. Preko dana, sunčevo zračenje zagrijava zemlju te je temperatura zraka iznad mora znatno niža, što uzrokuje gibanje zračnih masa. Zagrijani zrak iznad kopna se podiže, a na njegovo mjesto dolazi hladniji zrak s mora (slika 40. - lijevo). Glavni smjer vjetra je s mora prema kopnu. Taj se fenomen može primijetiti do 40 km udaljenosti od mora. Uobičajene brzine vjetra su do 10 m/s. Na nekim se lokacijama taj proces okreće u noćnim satima. Zemlja se hladi brže nego morska površina te se najčešće slabi vjetar javlja sa smjerom prema moru (slika 40. – desno).



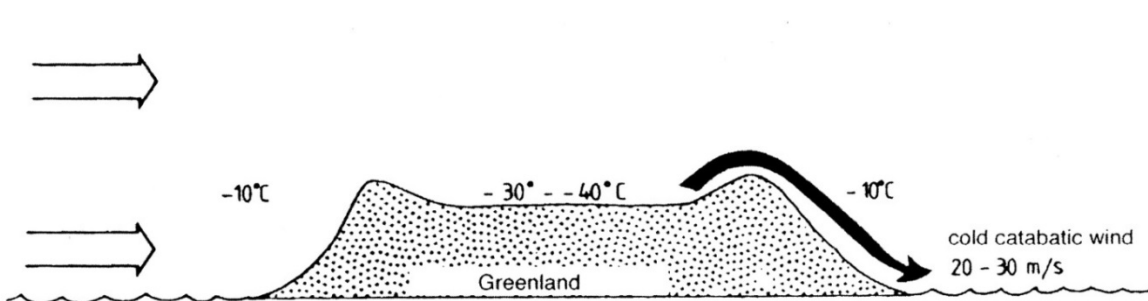
Slika 40. Priobalni vjetrovi: tijekom dana (lijevo) i tijekom noć (desno)

Planine imaju velik utjecaj na strujanje vjetra na određenom području. U ovom slučaju razlika u temperaturi, primjerice između vrha i podnožja planine, uzrokuje specifična zračna strujanja. Zrak se zagrijava na vrhu planine, te se diže, dok na njegovo mjesto dolazi hladniji zrak iz podnožje (slika 41. – lijevo). Tijekom noći situacija je obrnuta (slika 41. – desno). Kod priobalnih vjetrova postoji promjena smjera koja ovisi o dobi dana, dok su planinski vjetrovi pretežno dnevni, jednosmjerni vjetrovi.



Slika 41. Planinski vjetrovi: tijekom dana (lijevo) i tijekom noć (desno) [3]

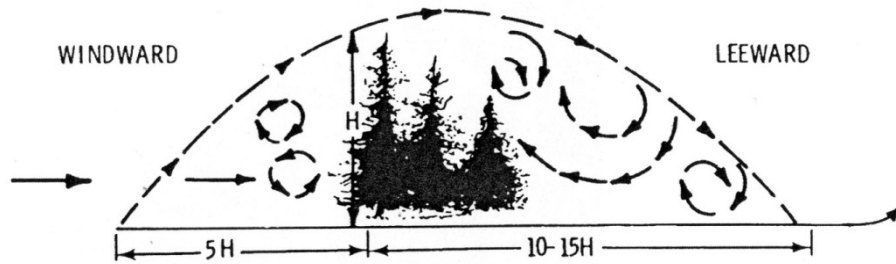
Katabatički vjetrovi kombiniraju utjecaje sunčevog zračenja i premještanje hladnih zračnih masa na račun toplih. Miješanjem hladnog zraka sa visina i toplog zraka blizu zemljine površine, dolazi do velikih brzina vjetrova. U Europi je najpoznatiji primjer katabatičkog vjetra bura, koja puše na prostorima sjevernog Jadrana te na Greenlandu (slika 42.).



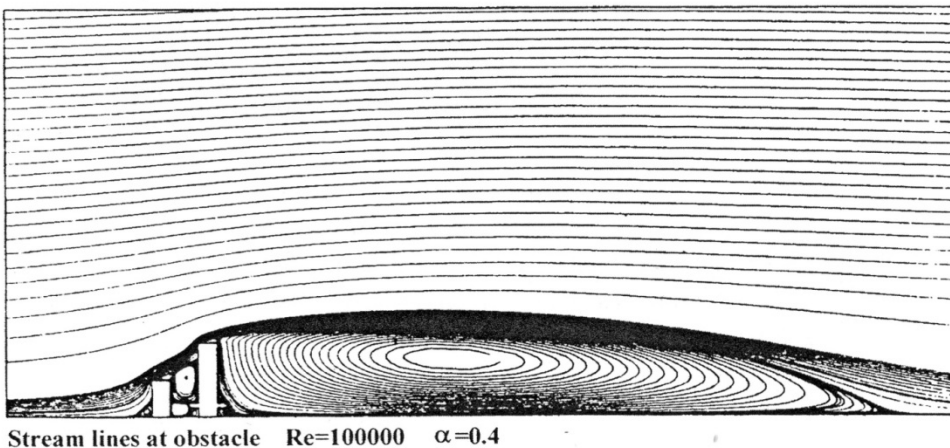
Slika 42. Katabatički vjetar [3]

2.4. Prepreke na tlu

Promjenjiva struktura zemljine površine, različita vegetacija, zgrade, pojedinačne prirodne ili umjetne prepreke, utječu na lokalni profil brzine vjetra (slika 43. i 44.). Ta činjenica smanjuje značaj vertikalne raspodjele brzine vjetra dobivene teoretskim razmatranjima. Uobičajeno je da se utjecaj zavjetrinske površine pojedine prepreke dobiva empirijski.



Slika 43. Poremećaj vjetra zbog šume [3]



Slika 44. Poremećaj vjetra zbog naselja [3]

2.5. Mjerenje brzine vjetra

Anemometar s vjetrovnom najčešće se koristi za mjerenje vjetra na meteorološkim postajama (slika 45. - lijevo). Robustan je, nema složen mehanizam i izlazni podaci direktno su proporcionalni brzini vjetra. U odnosu na ranije anemometre, anemometar s lopaticama ima nešto složeniji mehanizam (slika 45. - desno). Zbog horizontalno postavljene osi, ovaj uređaj može mjeriti brzinu vjetra uz prepoznavanje njegova smjera. Ultrazvučni anemometri mogu raditi i u vrlo teškim uvjetima. Nisu osjetljivi na prašinu, blato ili kišu, a ako su opskrbljeni grijačima, mogu raditi i pri vrlo niskim temperaturama. Kako ultrazvučni anemometri nemaju pomičnih dijelova, ne postoji mogućnost habanja. Do sada su se ultrazvučni anemometri uglavnom koristili u istraživačke svrhe. Anemometri s užarenom niti koriste užarenu nit kako bi mjerili električni otpor. Ako se takav anemometar postavi u struju zraka, ona će ohladiti žarnu nit, i njen će se električni otpor, zavisno o temperaturi, promijeniti. Takvi uređaji su osjetljivi na prašinu u zraku i ne mogu se upotrebljavati po kiši.



Slika 45. Anemometar s vjetrovuljom (lijevo) i anemometar s lopaticama (desno) [10]

2.6. Proračun izdvojene energije

Linearna srednja vrijednost brzine v tijekom vremenskog perioda $T = N\Delta t$, gdje je $n = 0, 1, 2, \dots, N$ iznosi [1]:

$$\bar{v} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T v(t) \cdot dt \approx \frac{1}{N+1} \cdot \sum_0^N v_n \quad (2.3)$$

dok se standardna devijacija računa prema jednadžbi:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T (v - \bar{v})^2 \cdot dt} \approx \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_0^N (v_n - \bar{v})^2} \quad (2.4)$$

Jednadžbe (2.3.) i (2.4.) daju vrijednosti koje se uglavnom koriste u meteorologiji. Omjer ovih dviju jednadžbi daje bezdimenzijski koeficijent intenziteta turbulencije, odnosno stupanj turbulencije:

$$I = \frac{\sigma}{\bar{v}} \quad (2.5)$$

Prema Goldingu koeficijent izdvajanja energije k_e može se izračunati na sljedeći način:

Teorijska snaga vjetra [1]:

$$P_{vjetra} = \frac{\rho}{2} \cdot A \cdot v^3 \quad (2.6)$$

sumirana za period T (dan, mjesec ili godinu) iznosi:

$$E_{vjetra} = \frac{\rho}{2} \cdot A \cdot \int_0^T v^3(t) \cdot dt \quad (2.7)$$

Slična jednadžba se dobije ukoliko se u obzir uzme srednja brzina vjetra:

$$E^* = \frac{\rho}{2} \cdot A \cdot \bar{v}^3 \cdot T \quad (2.8)$$

gdje su: A – površina zahvaćene zračne struje; T – vremenski period; ρ – gustoća zraka

Faktor izdvajanja energije je sljedeći:

$$k_e = \frac{E_{vjetra}}{E^*} = \frac{1}{T} \cdot \frac{\int_0^T v^3 \cdot dt}{\bar{v}^3} = \frac{1}{T} \cdot \frac{\int_0^T v^3 \cdot dt}{\left(\frac{1}{T} \cdot \int_0^T v \cdot dt \right)^3} \quad (2.9)$$

ili

$$k_e = \frac{\frac{1}{N+1} \cdot \sum_0^N v_n^3}{\bar{v}^3} = \frac{\frac{1}{N+1} \cdot \sum_0^N v_n^3}{\left(\frac{1}{N+1} \cdot \sum_0^N v_n \right)^3} \quad (2.10)$$

U idealnom stanju mirovanja zraka $v(t) = \bar{v}$ koeficijent izdvajanja energije je jednak jedinici. Što je veće odstupanje od srednje vrijednosti to je veći koeficijent izdvajanja energije, a samim time i izdvajanje energije

Područje rada vjetroturbine ograničeno je brzinom vjetra i kreće se od brzine uključivanja (v_{in}) do brzine isključivanja (v_{out}). Brzina uključivanja je najmanja brzina koja omogućuje rad (vrtnju) vjetroturbine, dok je brzina isključivanja najveća brzina pri kojoj vjetroturbina prestaje raditi zbog velikih dinamičkih opterećenja. Brzina vjetra, pri kojoj vjetroturbina daje snagu jednaku nazivnoj snazi generatora, naziva

se nazivna brzina v_{naz} .

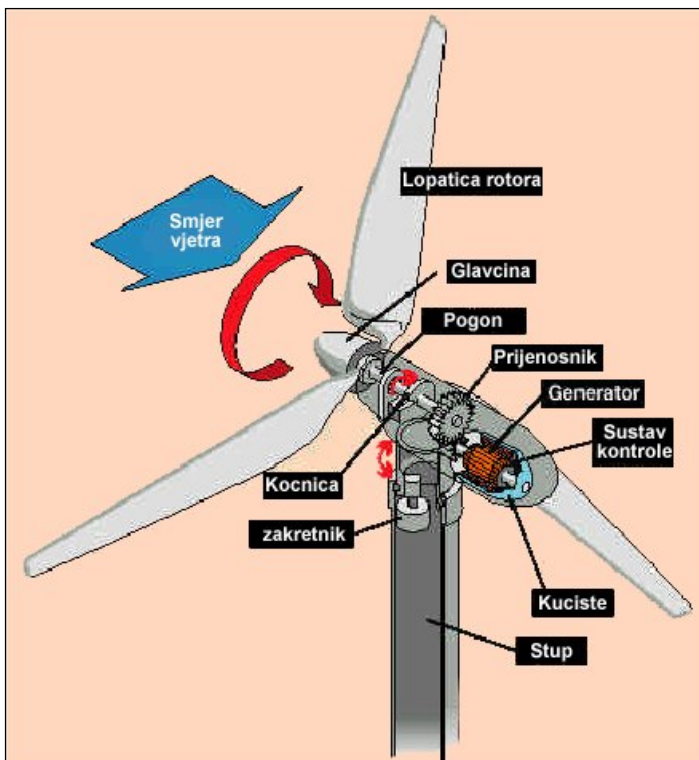
Projektna brzina v_{pr} ima najveću učestalost pojavljivanja (trajanja) unutar određenog vremenskog intervala. Točka projektne brzine nalazi se u području infleksije krivulje koeficijenta snage c_p .

Ne postoji jedinstveno mišljenje o definiciji projektne brzine, no opće je prihvaćena činjenica da u točki postizanja projektne brzine postoji maksimum pretvorbe energije. Neke od definicija su:

$$v_{pr} = \sqrt[3]{\frac{\int_{v_{in}}^{v_{out}} v^3 \cdot dt}{T}} \quad (1.11.)$$

3. Elementi vjetroturbine

Osnovni elementi vjetroturbine su: rotor (s lopaticama), kućište, prijenosnik snage, kočnice, generator, sustav regulacije i zaštite, zakretnik i stup (slika 46.): [3, 11-13].



***glavčina i kućište (u slici)

Slika 46. Osnovni elementi vjetroturbine [3]

3.1. Rotor

Rotor vjetroturbine sastoji se od glavčine i lopatica. Osnovne karakteristike koje definiraju rotor su: položaj osi vrtnje, omjer brzina na vrhu lopatica (nadalje omjer brzina) λ_D ili kutna brzina vrtnje ω , te broj lopatica.

Položaj osi vrtnje predstavlja osnovni razlikovni kriterij za vjetroturbine. Prema ovom kriteriju vjetroturbine se dijele na one s vertikalnom osi vrtnje i vjetroturbine s horizontalnom osi vrtnje.

Vjetroturbine s horizontalnom osi vrtnje dalje se, prema položaju rotora u odnosu na stup, mogu podijeliti na vjetroturbine kojima se rotor nalazi ispred stupa (engl. upwind rotor) i na vjetroturbine kojima se rotor nalazi iza stupa (engl. downwind rotor). Vjetroturbine s rotorom ispred stupa puno su češće od onih kojima je rotor iza stupa. Glavni razlog je taj da kod vjetroturbina, s rotorom iza stupa lopatica prolazi kroz već poremećenu struju vjetra, što rezultira većom bukom i pojavom dodatnih dinamičkih opterećenja.

Snaga vjetroturbine računa se prema već spomenutoj jednadžbi $P = M \cdot \omega = M \cdot 2 \cdot \pi \cdot n$ i ona izravno ovisi o kutnoj brzini vrtnje $\omega = 2 \cdot \pi \cdot n$, a time i o omjeru brzina $\lambda_D = \frac{\omega \cdot r}{v_1}$. Sporohodne vjetroturbine

($\lambda_D = 1$) imaju visoki zakretni moment, te stoga zahtijevaju visoku gustoću lopatica (veću nastrojavanu površinu), što rezultira većom silom na stup kada turbina miruje. Stoga, prilikom mirovanja, rotor mora biti okrenut izvan struje vjetra.

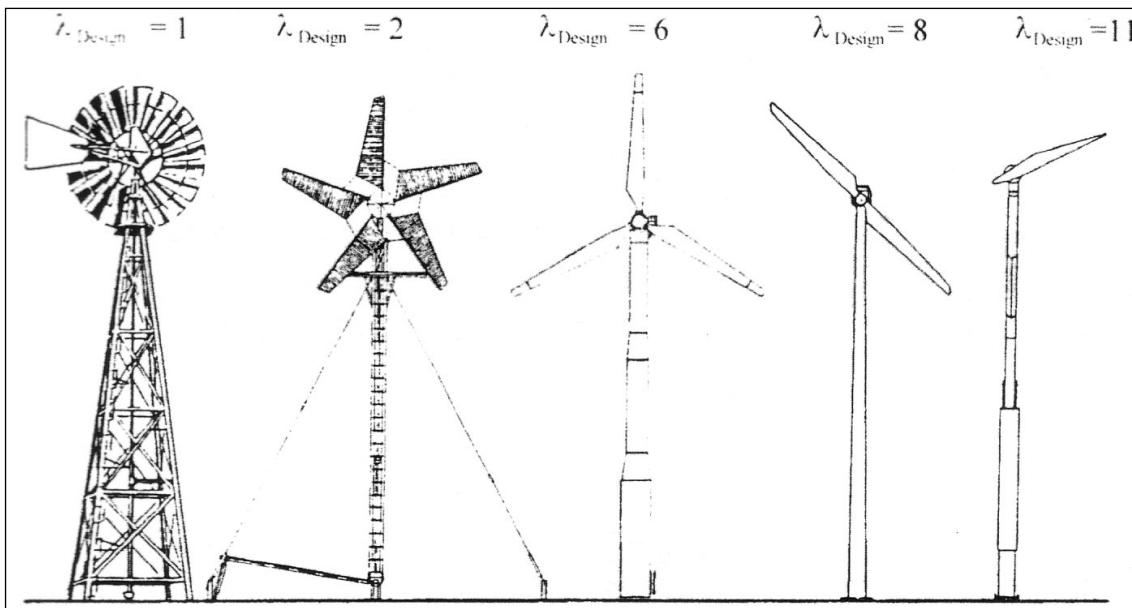
Kako je kod vjetroturbina s konstantnim brojem okretaja omjer brzina λ_D proporcionalan omjeru n/v , on se mijenja zavisno o brzini vjetra, pa stoga može doseći vrijednost λ_D (projektnu vrijednost za svoju aerodinamičku konstrukciju) samo za određenu vrijednost brzine vjetra. Vjetroturbine s promjenjivom brzinom vrtnje imaju veću učinkovitost rotora, no da bi se osigurala konstantna frekvencija mreže (50 Hz) zahtijevaju sofisticiraniju opremu.

Izvedba rotora također ovisi i o načinu reguliranja snage. Regulacija napadnog kuta zakretanjem lopaticice tijekom rada, na način da se postavlja u optimalan položaj (engl. pitch), složen je proces. Rotori takvih vjetroturbina su skuplji, no i nužni, ukoliko su lopaticice duže od 25 metara. Poseban motor za zakretanje mijenja ugradbeni kut lopaticice, a time i napadni kut vjetra. Promjena napadnog kuta mijenja se zbog smanjenja snage vjetroturbine kod brzine vjetra iznad projektne, te namješta na optimalnu vrijednost prilikom starta vjetroturbine, i za sve brzine vjetra koje su manje od projektne.

Druga vrsta rotora koristi aerodinamički efekt (engl. stall) poremećenog trokuta brzina za regulaciju snage vjetroturbine. Porastom brzine vjetra iznad projektne vrijednosti dolazi do promjene trokuta brzina, a time i napadnog kuta vjetra – kut prestaje biti optimalan. Ovisno o njegovu iznosu dolazi do porasta otpora, odnosno gubitka uzgona. Lopaticice vjetroturbine su učvršćene, bez mogućnosti zakretanja tijekom rada, ali s unaprijed namještenim kutom za područje brzine vjetra za koje je vjetroturbina projektirana, što omogućava najveće izdvajanje energije.

3.2. Lopatice

Broj lopatica rotora indirektno ovisi o omjeru brzina λ_D (slika 47). Kao što je već spomenuto, sporohodne vjetroturbine ($\lambda_D = 1$) zahtijevaju visoku gustoću lopatica (veću nastrujavanu površinu), što je i razlog da te vjetroturbine imaju 20-30 lopatica (slika 47.). Brzohodne turbine ($\lambda_D = 6$) zahtijevaju malu gustoću lopatica (manju nastrujavanu površinu), što je i razlog da imaju samo 1 - 4 lopatica (slika 47.).



Slika 47. Usporedba broja lopatica na rotoru sporohodnih i brzohodnih vjetroturbina [3]

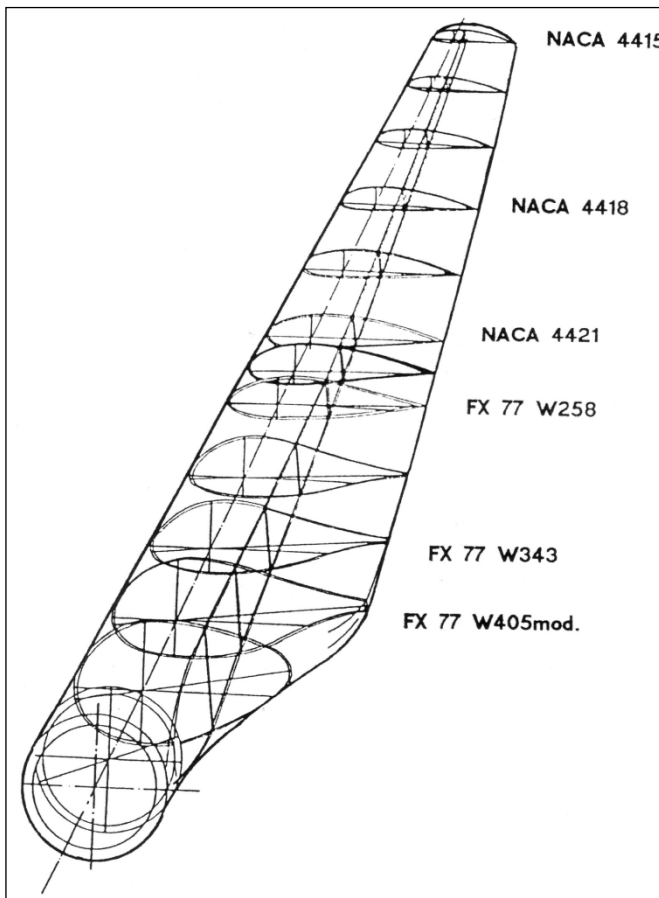
Jedan od glavnih razloga što današnje brzohodne vjetroturbine imaju tako mali broj lopatica je visoka cijena ove komponente (npr. cijena rotora s 3 lopatice čini 20% ukupnih troškova izgradnje vjetroturbine).

Sporohodne vjetroturbine su zbog visokog okretnog momenta pogodne za mehanički pogon (npr. pumpi), dok brzohodne vjetroturbine postižu snagu na temelju brzine vrtnje pa su stoga pogodne za pogon električnih generatora.

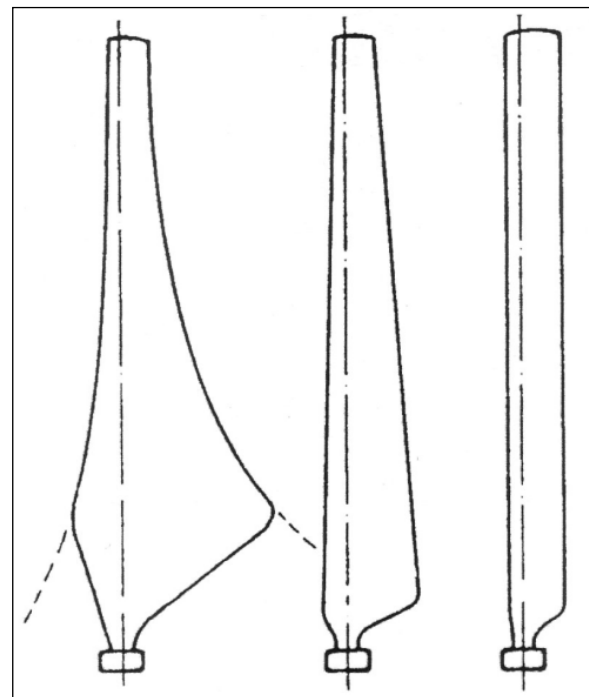
Konstrukcija pojedine lopatice definirana je njenim profilom, vanjskom geometrijom i upotrijebljenim materijalom. Različiti omjeri brzina λ_D zahtijevaju i različitu kvalitetu profila, što uvjetuje izbor materijala i tehnologiju izrade rotorske lopatice, o čemu će biti govora u nastavku.

Aerodinamičko i konstrukcijsko optimiziranje lopatice rotora rezultira složenom geometrijom lopatice. Lopatice ovakve geometrije teško bi mogle biti proizvedene bez korištenja kompozitnih materijala. Iz slike 48. je vidljivo da profil lopatice varira prema načinu učvršćivanja lopatice u glavčinu.

Na slici 48. su prikazani neki od standardnih profila lopatica (NACA, Wortington), te pojednostavljena u geometriji koja olakšavaju proces izrade (slika 49.).

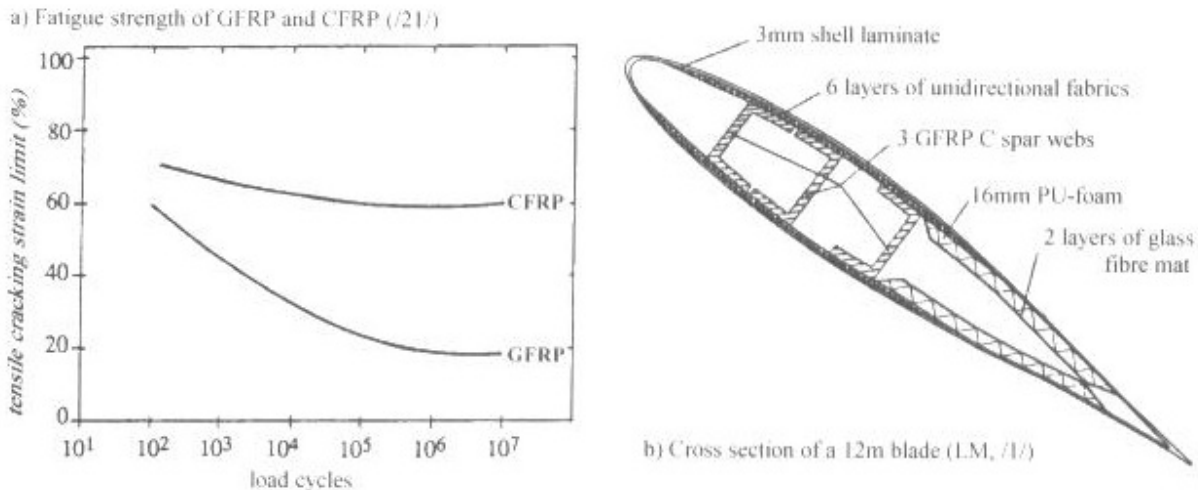


Slika 48. Prikaz različitih profila po presjecima lopatice [3]



Slika 49. Pojednostavljena lopatice korištenjem jednostavne geometrije [3]

Profili brzohodnih turbina su pretežno lamelirani. Za njihovu izradu se koristi poliester ojačan staklenim vlaknima (GFRP) ili, u novije vrijeme, plastika ojačana karbonskim vlaknima (CFRP). Iako je CFRP skuplji, njegova zamorna čvrstoća je tri puta veća (slika 50.) i zbog toga su idealni za laganu konstrukciju.



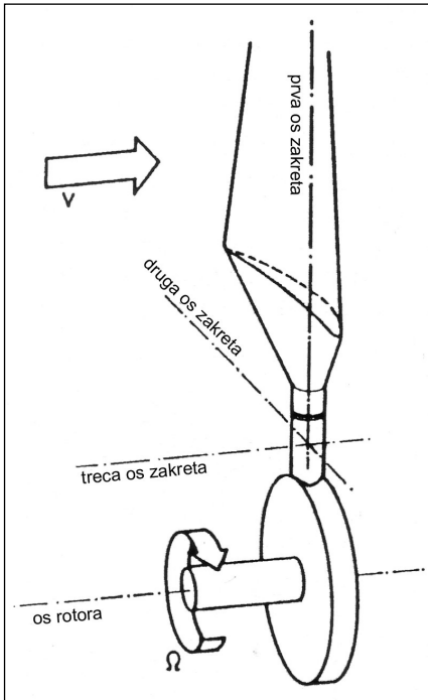
Slika 50. Zamorna čvrstoća GFRP i CFRP (lijevo) i poprečni presjek 12 m duge lopatice (desno) [3]

3.3. Glavčina

Lopatice rotora mogu biti učvršćene u glavčinu na kruti ili na pomičan način, što ovisi o mogućnosti pomicanja lopatica oko uzdužne osi (engl. flapping), što je prikazano na slici 51.

Teoretski postoje tri stupnja slobode gibanja lopatice. Većina proizvođača zagovara krutu vezu između lopatice i glavčine, i to isključivo zbog smanjenja broja pomičnih komponenata podložnih kvarovima i jednostavnije konstrukcije. Pri velikim brzinama vjetra, lopatice koje su kruto vezane za glavčinu nastrojene su čitavom svojom površinom i moraju se oduprijeti velikom statičkom tlaku, pa stoga, pomična veza lopatice i rotora predstavlja dobro rješenje, unatoč visokim troškovima i složenijoj konstrukciji. Pomična veza značajno smanjuje vršna opterećenja pri naletima vjetra te omogućuje lakšu konstrukciju. Za razliku od malih, kod velikih vjetroturbin dodatna oprema potrebna za ostvarivanje pomične veze između glavčine i lopatice nije toliko velika stavka u sveukupnim troškovima, tako da gotovo ni ne postoje vjetroturbine veličine 1 MW i veće, koje bi imale krutu vezu lopatice i glavčine.

Kao što je već prije spomenuto, zakretom lopatice oko njezine vertikalne osi dolazi do promjene napadnog kuta, a time i do promjene jačine sila na lopaticu. Dovođenjem lopatice u optimalan položaj (engl. pitch) utječe se na izlaznu snagu vjetroturbin, dok dovođenjem u tzv. položaj pera (engl. feather), ne samo da se smanjuju sile uzgona i otpora na lopaticu, već se smanjuje i opterećenje na rotor. Slično, dovođenjem u optimalan položaj (engl. pitch) smanjuju se kvazistatička opterećenja, koja nastaju kao posljedica aerodinamičkih sila prilikom oluja.



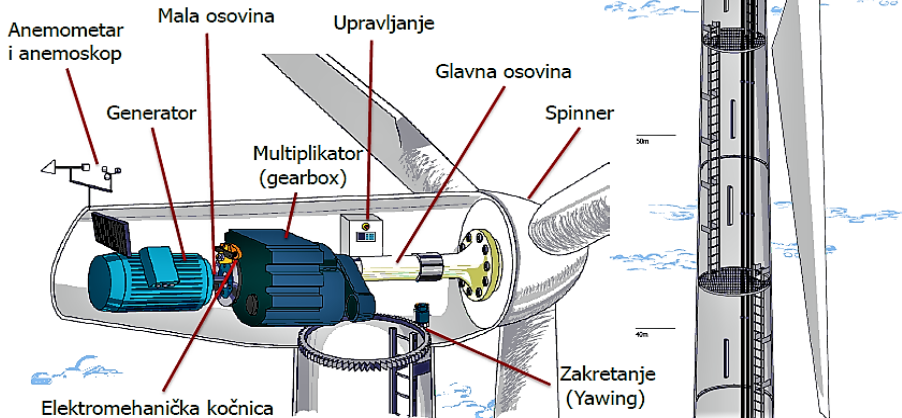
Slika 51. Učvršćenje lopatica na glavčinu [3]

3.4. Pogonska linija

Tzv. pogonska linija se sastoji od: vratila s ležajevima, kočionog sustava, prijenosnika snage i generatora, smještenih u gondoli (slika 52.). Postoje različite izvedbe i razmještaji navedenih komponenti (tzv. pojedinačna i integrirana izvedba). Često se vode rasprave o tome koja je od njih tehnički i ekonomski najisplativija.

Zavirimo u unutrašnjost gondole...

- Gondola (engl. *Nacelle*)
 - oplata za mirujući i rotirajući dio (engl. *Spinner*)



Slika 52. Pogonska linija smještena u gondoli

3.5. Kočioni sustav

Kočioni sustav služi za rasterećenje prijenosnika snage od izrazitog dinamičkog opterećenja uslijed naleta vjetra, i zaustavlja rotor kada brzina vjetra prijeđe brzinu isključivanja ili kad generator ispadne iz mreže (tzv. pobijeg). Primarni kočioni sustav čini mehanička kočnica, a sekundarni aerodinamička kočnica. Najčešća izvedba kočionog sustava je disk-kočnica (slika 52.).

Vrlo važna uloga kočionog sustava je i održavanje konstantne projektne brzine vrtnje, što osigurava dinamički uravnoteženo djelovanje sustava (problem prirodnih vibracija pojedinih dijelova vjetroturbine).

3.6. Prijenosnik snage

Prijenosnik snage je najčešće multiplikator u raznim izvedbama, dok se negdje spominju još i hidraulički pumpa-motor prijenosnici (slika 52.).

Podatci o načinu prijenosa okretnog momenta s vratila, povezanog s rotorom na električni generator, uključuju vrstu prijenosa, prijenosni omjer i materijale od kojih su izrađeni pojedini elementi sklopa. Kućište prijenosnika u većini slučajeva se hladi zrakom, dok se za njegovo podmazivanje najčešće koriste sintetička ulja.

3.7. Generator

Pogon generatora predstavlja osnovni zadatak dijela vjetroturbine koji čine rotor, kočnice i prijenosnik snage (slika 52.). Kako je odabir vrste generatora vrlo složen proces, u nastavku će biti navedeni samo zahtjevi koji se postavljaju u odnosu na generator:

1. visoka iskoristivost u širokom području opterećenja i brzina vrtnje;
2. rješenja za načine uležištenja (**ugradnje???) moraju biti dugoročna;
3. po mogućnosti što veća pouzdanost uz što manje održavanja;
4. otpornost na povećanu vlažnost, koncentraciju soli u zraku, povišene temperature, itd.

Osim podjele po veličini, vrlo je bitna i podjela prema načinu rada, tj. je li vjetroturbina projektirana za paralelni rad s mrežom, samostalan rad ili za rad s drugim izvorima.

Prema vrsti struje koju daju, generatori mogu biti istosmjerni i izmjenični, dok se prema brzini vrtnje dijele na one s promjenjivom i one s nepromjenjivom brzinom .

3.8. Gondola

Gondola vjetroturbine ima dvojaku ulogu (slika 52.). Osim što štiti komponente vjetroturbine od vanjskih vremenskih utjecaja, kao što su kiša, direktna izloženost suncu, povećana koncentracija soli u zraku i sl., njezina uloga je i smanjivanje buke koju vjetroturbina emitira tijekom rada, tj. zaštita okoliša od prekomjerne buke.

3.9. Zakretnik

Uloga zakretnika je zakretanje rotora u položaj u kojemu je njegova os paralelna sa strujom zraka, dok pri jakim naletima vjetra i olujama zakretnik okreće rotor izvan struje zraka i dovodi ga u položaj najmanjeg opterećenja, tzv. preživljavanja (sl.2.6.). Najčešće se upotrebljavaju električni ili hidraulički zakretnici. Sustav za regulaciju zakretanja kućišta je izrađen tako da ne reagira na manje poremećaje smjera vjetra.

Slika 53. Sustav zakretanja gondole

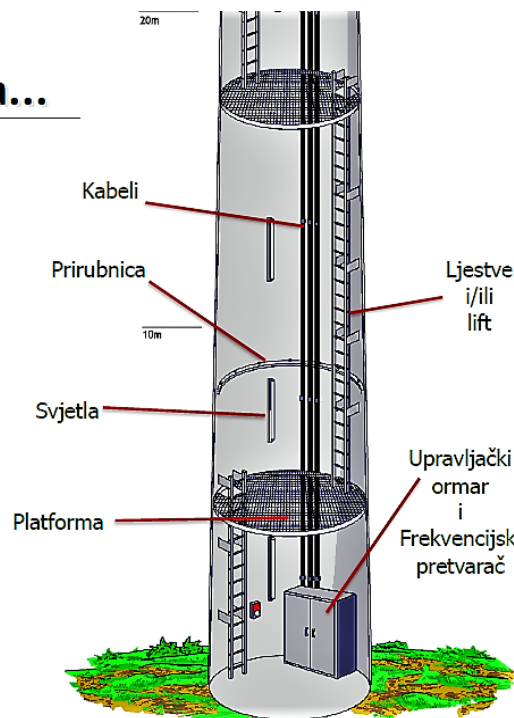
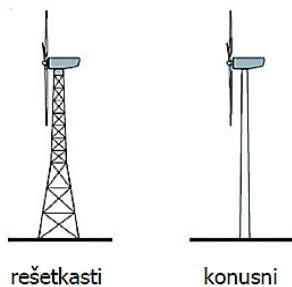
3.10. Stup

Stup nosi cjelokupni turbinsko-generatorski dio vjetroturbine (slika 54.). Neke od izvedbi su rešetkasta (engl. lattice tower) ili cjevasta (engl. tubular tower) izvedba stupova. Jedna od važnih prednosti rešetkaste konstrukcije stupa je to da se može lako rastaviti na manje dijelove, pa je stoga jednostavnija za transport i montažu.

No, zbog veće čvrstoće i otpornosti na vibracije, cjevasta izvedba je puno zastupljenija u današnjim aplikacijama.

Zavirimo u unutrašnjost stupa...

- Viši stup → snažniji i manje turbulentan vjetar
 - $H_{\text{stup}} \sim D_{\text{rotor}}$
 - težina: 50 – 200 tona
- Fleksibilni i u segmentima



Slika 54. Stup vjetroagregata

3.11. Upravljački i nadzorni sustav

Zadaće ovog sustava su sljedeće: nadzor i upravljanje radnim procesima i sustavima zaštite, komunikacija s osobljem koje opslužuje cjelokupni sustav, predočavanje podataka o radu, obrada podataka i uzbunjivanje u slučaju kvara.

Sustavi regulacije, nadzora i zaštite bit će detaljnije obrađeni u posebnom poglavlju u nastavku.

4. Dimenzioniranje vjetroturbina prema Betzu i Schmitzu

Proračuni dani u nastavku daju jednadžbe za duljinu tetive i zakret lopatice, ovisno o polumjeru na kojem se nalazi promatrani presjek [3, 11-13]. . Prije pristupanja proračunu, potrebno je odrediti omjer brzina λ_D , profil lopatice, napadni kut α_A , te koeficijent uzgona c_L .

Betzova teorija uzima u obzir aksijalne gubitke, dok Schmitz dodatno razmatra gubitke uslijed vrtloga koji nastaje kao rezultat prolaska kroz rotor. Ove razlike u proračunima rezultiraju i različitom geometrijom lopatica, posebice za sporohodne turbine ($\lambda_D < 2.5$).

4.1. Koliko se snage može dobiti iz vjetra

Jednadžba za kinetičku energiju mase u gibanju je:

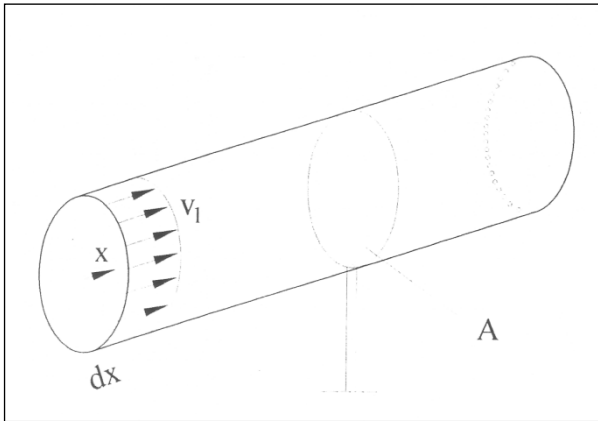
$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (4.1)$$

Budući da se maseni protok računa prema:

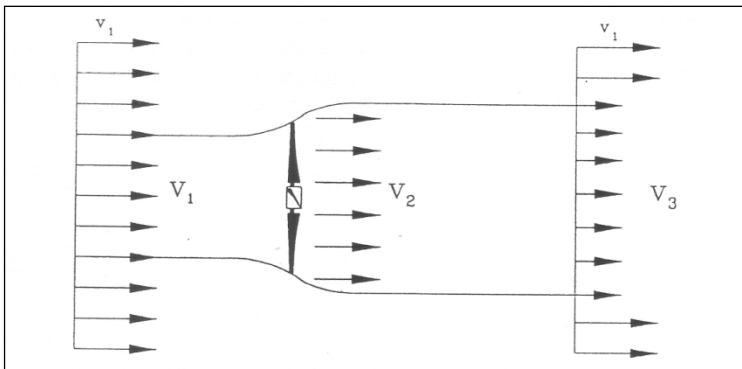
$$\dot{m} = \rho \cdot A \cdot \frac{dx}{dt} \quad (4.2)$$

pomoću jednadžbe (4.1) se za snagu vjetra koji struji kroz kontrolnu površinu A (slika 55) može napisati:

$$\dot{E} = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3 \quad (4.3)$$

Slika 55. Strujanje zraka brzinom v_1 kroz kontrolnu površinu A [3]

Kao što je vidljivo iz slike 55, Betz je pretpostavio homogeno strujanje zraka brzine v_1 koje se nakon rotora usporava na brzinu v_3 (dovoljno daleko iza rotora).



Slika 56. Strujanje zraka kroz idealni rotor vjetroturbine [3]

Strujanje je stoga zamišljeno kao cijev omeđena divergentnim strujnicama. Iz jednadžbe kontinuiteta za pojedine presjeke slijedi:

$$\rho \cdot v_1 \cdot A_1 = \rho \cdot v_2 \cdot A_2 = \rho \cdot v_3 \cdot A_3 \quad (4.4)$$

Budući da je smanjenje tlaka gotovo zanemarivo, gustoća zraka se smatra konstantnom.

Izdvojena kinetička energija jednaka je razlici kinetičkih energija ispred i iza rotora

$$E_{ex} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (v_1^2 - v_3^2) \quad (4.5)$$

pa se, stoga, izdvojena snaga može računati prema jednadžbi:

$$\dot{E}_{ex} = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot (v_1^2 - v_3^2) \quad (4.6)$$

Ukoliko ne bi bilo usporavanja struje vjetra ($v_1 = v_3$), izdvojena snaga bila bi jednaka nuli. Ako bi struja vjetra bila previše usporena, maseni protok bi bio premalen. U kritičnom slučaju ($\dot{m} = 0$) došlo bi do zagušenja ($v_3 = 0$), te bi izdvajanje energije bilo nemoguće. Može se pretpostaviti da postoji neka vrijednost v_3 ($0 < v_3 < v_1$) pri kojoj će izdvojena snaga biti maksimalna.

Vrijednost v_3 je moguće izračunati ako je poznata brzina v_2 u ravnini rotora. Maseni protok u presjeku 2 je:

$$\dot{m} = \rho \cdot A \cdot v_2 \quad (4.7)$$

U ovom trenutku je za pretpostaviti da se brzina v_2 u ravnini rotora može izračunati prema jednadžbi:

$$v_2 = \frac{v_1 + v_3}{2} \quad (4.8)$$

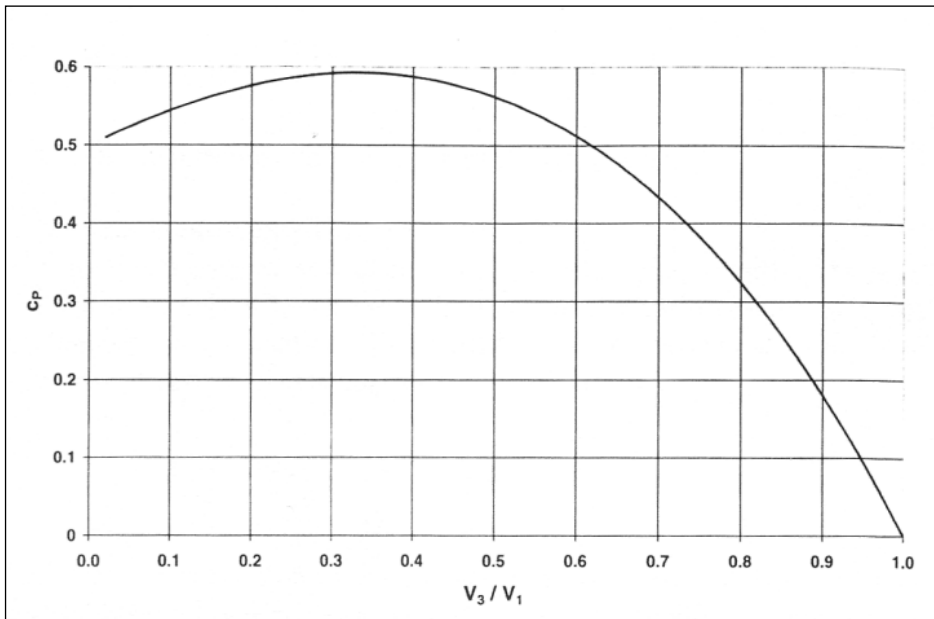
što će u nastavku biti i dokazano.

Ukoliko se jednadžbe (4.7) i (4.8) uvrste u jednadžbu (4.6) dobije se:

$$\dot{E}_{ex} = \underbrace{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3}_{snaga_vjetra} \cdot \underbrace{\left\{ \frac{1}{2} \cdot \left[1 + \frac{v_3}{v_1} \right] \cdot \left[1 - \left(\frac{v_3}{v_1} \right)^2 \right] \right\}}_{koficijent_snage_c_p} \quad (4.9)$$

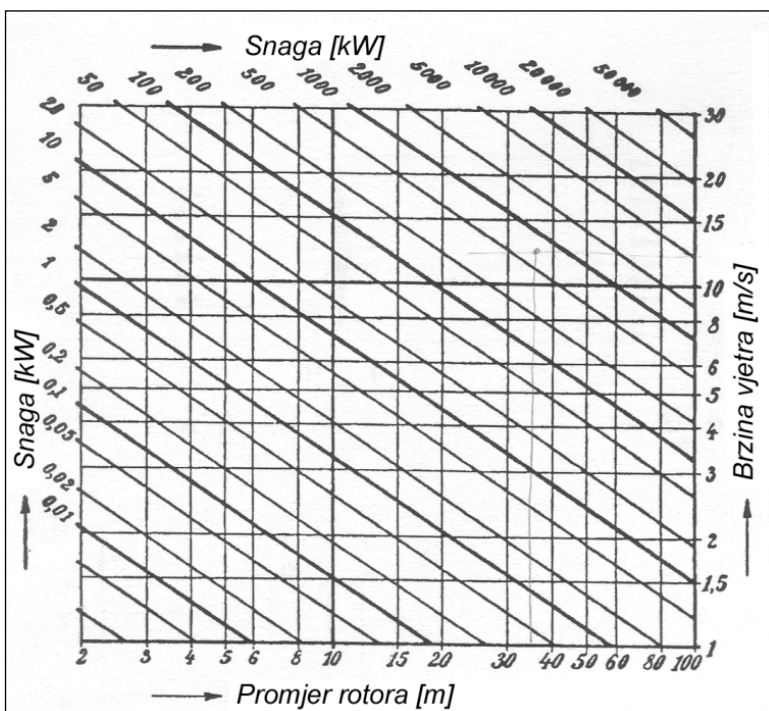
Snaga vjetra pomnožena s koeficijentom snage (zavisnog o omjeru v_3 / v_1) daje izdvojenu snagu. Maksimalni koeficijent snage dobiva se u slučaju kada se struja vjetra uspori s brzine v_1 na brzinu

$$v_3 = \frac{1}{3} \cdot v_1 \text{ i on iznosi } c_{p,Betz} = \frac{16}{27} = 0.59 \text{ (slika 57) .}$$



Slika 57. Koeficijent snage c_p u zavisnosti o omjeru v_3/v_1 [3]

Slika 58. prikazuje veličinu snage (ovisno o brzini vjetra i promjeru rotora vjetroturbine) koja se može izdvojiti u idealnom slučaju ($c_{p,Betz} = 0.59$).



Slika 58. Snaga vjetroturbina u zavisnosti o brzini vjetra i promjeru rotora [3]

Potisak turbine u ravnini rotora za slučaj optimalnog izdvajanja snage je sljedeći:

$$T = \dot{m} \cdot (v_3 - v_1) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot (v_1 - v_3) \cdot (v_1 + v_3) \quad (4.10)$$

odnosno uz $v_3 = \frac{1}{3} \cdot v_1$, slijedi

$$T = c_T \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1^3 \right) \cdot A \quad (4.11)$$

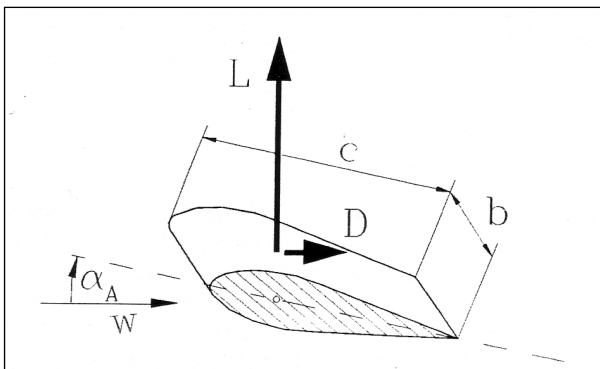
gdje je $c_T = \frac{8}{9} = 0.89$.

Izraz u zagradi predstavlja dinamički tlak na površini A . Usporedivši ovaj izraz za potisak prilikom maksimalnog izdvajanja snage uz postojanje otpora, vidimo da je potisak za 20% manji od otpora.

4.2. Teorija aeroprofila

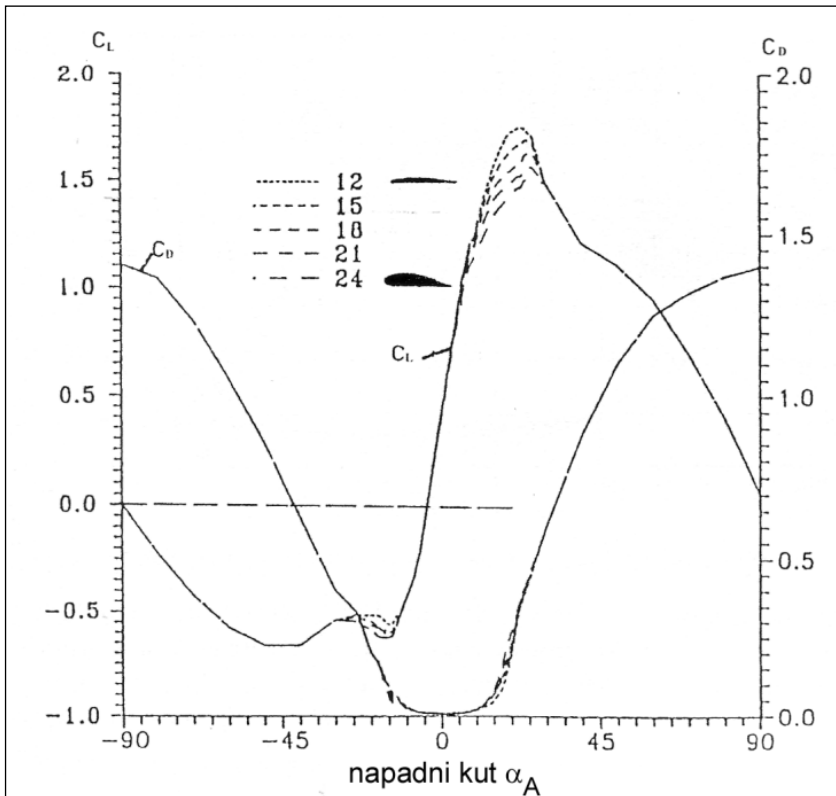
Ukoliko je napadni kut $\alpha_A = 0$, sila uzgona L je jednaka nuli, dok je sila otpora D jako mala. Porast sile uzgona postiže se povećanjem napadnog kuta. Iznos sile uzgona L proporcionalan je površini lopatice (tetiva c x širina b) i kvadratu relativne brzine (slika 59.):

$$L = c_L(\alpha_A) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot w^2 \cdot c \cdot b \quad (4.12)$$



Slika 59. Sila uzgona L i sila otpora D elementa lopatice širine b [3]

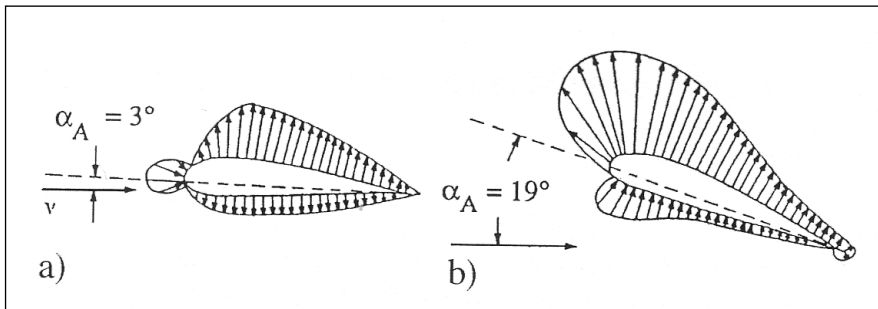
Izrazom $c_L = c_L(\alpha_A)$ naglašena je ovisnost o napadnom kutu. Slično kao i koeficijent sile otpora $c_D(\alpha_A)$ i on se određuje eksperimentalno. Rezultati jednog takvog mjerenja prikazani su na slici 60.



Slika 60. Koeficijenti uzgona c_L i otpora c_D u zavisnosti o napadnom kutu α_A izmjereni u zračnom tunelu za profile NACA 4412 i 4424 [3]

Pri malim napadnim kutovima ($0 < \alpha_A < 10^\circ$) koeficijent uzgona c_L , te stoga i sila uzgona L , rastu linearno s porastom napadnog kuta α_A . Krivulja nakon toga postaje položajija, te za neki kut doseže maksimalnu vrijednost. Pri velikim napadnim kutovima strujanje se počinje odvajati od profila. U ovom području ($\alpha_A < 15^\circ$) uzgon se smanjuje, dok se koeficijent c_D , a time i sila otpora, naglo povećavaju (slika 60.).

Čestice s gornje strane profila gibaju se većom brzinom od onih s donje strane jer moraju prevaliti veću udaljenost (slika 61.). Iz Bernoullijeve jednadžbe proizlazi da je na gornjoj strani profila tlak niži od onoga na (**gornjoj???) donjoj strani. ***PROVJERITI !!! Kriva tvrdnja.



Slika 61. Raspodjela brzine po profilu [3]

Integriranjem izraza $p \cdot ds$ po površini profila, dobiva se rezultirajuća sila F :

$$F = \sqrt{L^2 + D^2} \quad (4.13)$$

U području za $\alpha_A < 15^\circ$ hvatište ove sile se nalazi na $25 \div 30\%$ duljine tetive. Ukoliko je $\alpha_A \geq 15^\circ$ (odcjepljenje strujanja) hvatište sile se pomiče prema izlaznom bridu lopatice. Za $\alpha_A = 90^\circ$ (totalno odcjepljenje) hvatište sile se nalazi gotovo na polovici tetive. U ovom slučaju lopatica stoji gotovo okomito (poprečno) na smjer relativne brzine i opstrujavana je gotovo simetrično.

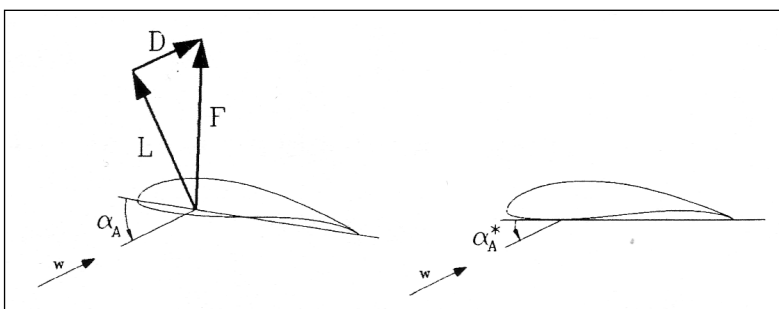
Za ravnu ploču se koeficijent uzgona može odrediti pomoću jednadžbe:

$$c_L = 2 \cdot \pi \cdot \alpha_A \quad (4.14)$$

Za realne profile koeficijent uzgona je nešto niži:

$$c_L(\alpha_A) = (5.1 \div 5.8) \cdot \alpha_A \quad (4.15)$$

Prilikom procesa konstruiranja vrlo je bitno obratiti pozornost odakle se mjeri napadni kut, kao što prikazuje slika 62.

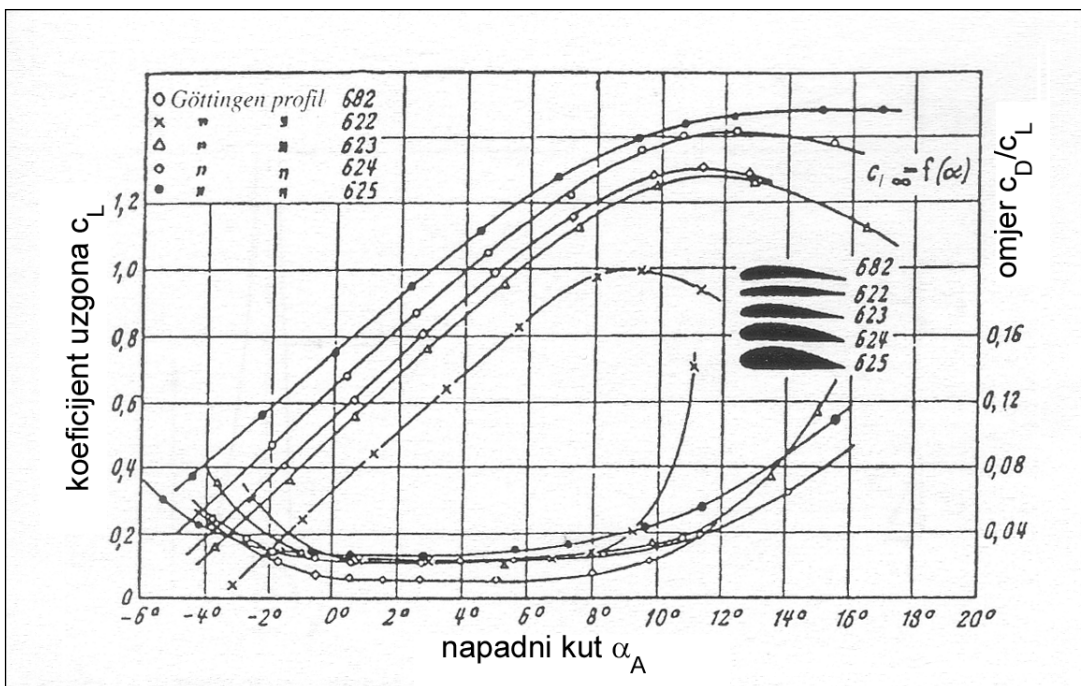


Slika 62. Postavljanje referentne linije za određivanje napadnog kuta [3]

U svakom slučaju nulta linija uzgona ($c_L = 0$) dobije se za negativni napadni kut. Za nulti kut uzgona ($\alpha_A = 0$) javlja se pozitivna sila uzgona, kao posljedica zakrivljenosti profila (slika 62.).

Na slici 63. je vidljivo da što je profil tanji, niži je koeficijent c_D za niži napadni kut α_A . Za asimetrične, kao i za simetrične profile, nagib uzlaznog dijela krivulje približno iznosi:

$$c'_L = \frac{dc_L}{d\alpha_A} \approx 2 \cdot \pi$$



Slika 63. Koeficijent uzgona c_L i omjer c_D/c_L za neke Göttingove profile [3]

U nastavku će se koristiti omjer:

$$\varepsilon(\alpha_A) = \frac{L}{D} = \frac{c_L(\alpha_A)}{c_D(\alpha_A)} \quad (4.16)$$

Omjer $\varepsilon(\alpha_A)$ će postići maksimalnu vrijednost za umjerene napadne kutove, tj. u slučaju je $0.8 < c_L < 1.1$, i on predstavlja mjeru za kvalitet profila. Visokokvalitetni profili dosežu vrijednosti $\varepsilon_{\max} = 60$ i više.

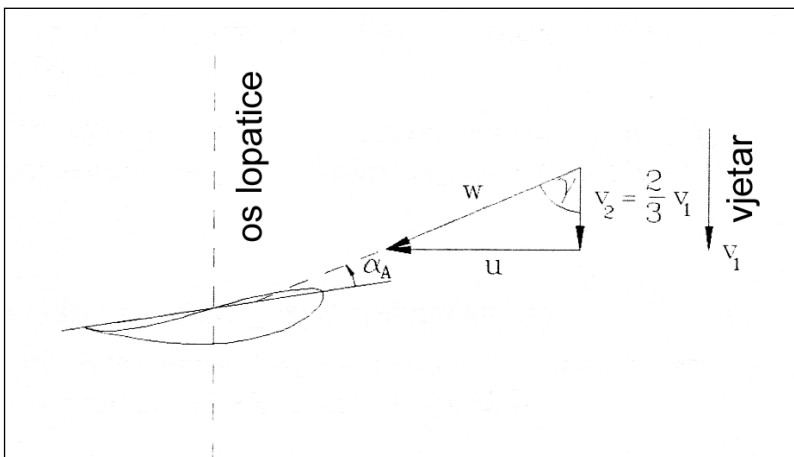
4.3. Uvjeti strujanja i aerodinamičke sile na rotirajuću lopaticu

4.3.1. Trokuti brzina

Relativnu brzinu vjetra w je moguće odrediti za svaki poprečni presjek lopatice. Relativna brzina w se sastoji od brzine $v_2 = \left(\frac{2}{3}\right) \cdot v_1$ i obodne brzine $u = \omega \cdot r$ (slika 64.).

Iz slike 64. slijedi:

$$w^2(r) = \left(\frac{2}{3} \cdot v_1\right)^2 + (\omega \cdot r)^2 \quad (4.17)$$



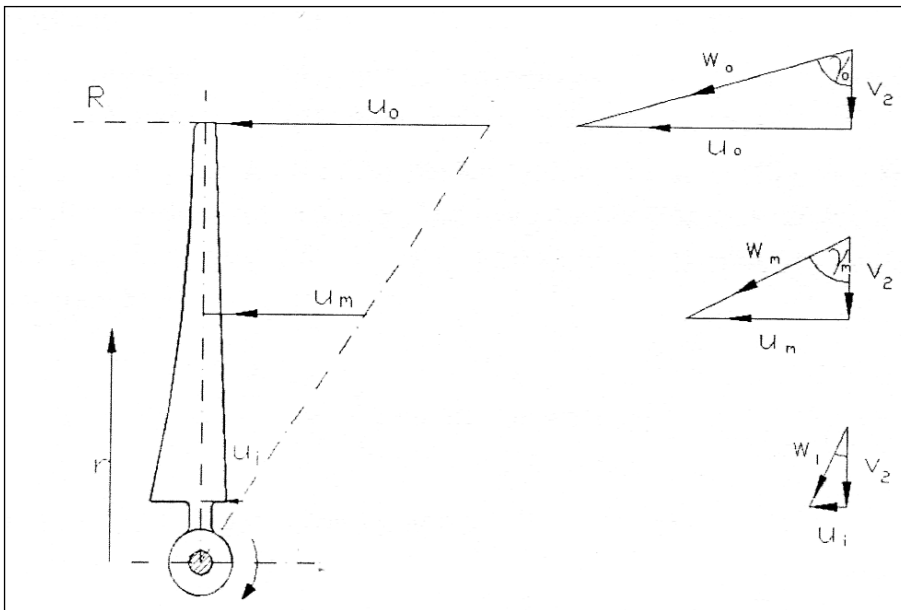
Slika 64. Trokut brzina [3]

gdje je γ kut koji relativna brzina w zatvara sa smjerom brzine vjetra v_2 tj.:

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{\omega \cdot r}{v_2} \quad (4.18)$$

Uvođenjem koeficijenta omjera brzina $\lambda_D = \frac{\omega \cdot r}{v_1}$ može se pisati.:

$$\operatorname{tg}\gamma = \frac{3 \cdot r \cdot \lambda_D}{2 \cdot R} \quad (4.19)$$

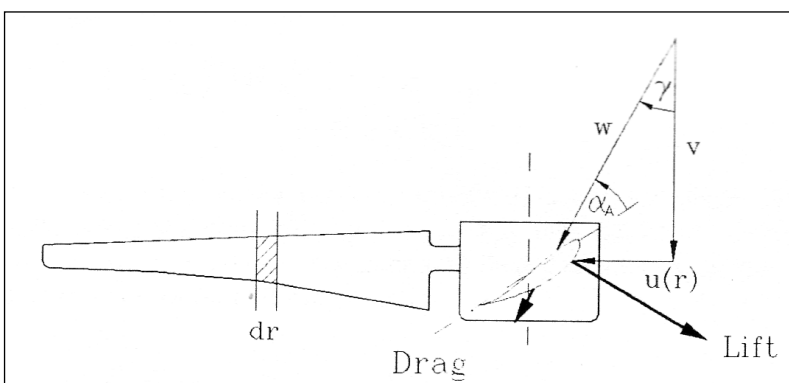


Slika 65. Trokuti brzina za različite poprečne presjeke [3]

Na slici 65. se vidi da se trokuti brzina razlikuju od presjeka do presjeka, jer obodna brzina raste linearno s povećanjem polumjera ($u = \omega \cdot r$)

4.4. Aerodinamičke sile na rotirajuću lopaticu

Sila uzgona L i sila otpora D , koje djeluju na diferencijalno maloj površini lopatice, čije se hvatište nalazi na $\frac{1}{4}$ duljine tetive, mogu se napisati u sljedećem obliku (slika 66.):



Slika 66. Aerodinamičke sile na element lopatice dr [3]

Sila uzgona:

$$dL = \frac{\rho}{2} \cdot w^2 \cdot c \cdot dr \cdot c_L(\alpha_A) \quad (4.20)$$

Sila otpora:

$$dD = \frac{\rho}{2} \cdot w^2 \cdot c \cdot dr \cdot c_D(\alpha_A) \quad (4.21)$$

Rastavljanjem sila na komponente u obodnom (tangencijalnom) smjeru dobiva se:

$$dU = \frac{\rho}{2} \cdot w^2 \cdot c \cdot dr \cdot [c_L(\alpha_A) \cdot \cos \gamma - c_D(\alpha_A) \cdot \sin \gamma] \quad (4.22)$$

$$dT = \frac{\rho}{2} \cdot w^2 \cdot c \cdot dr \cdot [c_L(\alpha_A) \cdot \sin \gamma - c_D(\alpha_A) \cdot \cos \gamma] \quad (4.23)$$

jer se sila uzgona definira kao okomita na smjer relativne brzine vjeta w , dok je sila otpora paralelna s njom.

4.5. Dimenzioniranje po Betzu

Prema već izvedenim jednadžbama slijedi da je maksimalna snaga koju je moguće izdvojiti na kružnom prstenu:

$$\dot{E}_{Betz} = \frac{16}{27} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_1^3 \cdot (\pi \cdot R^2) \quad (4.24)$$

Rotor će biti konstruiran tako, da će se na svakom kružnom prstenu površine $2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr$ moći izdvojiti snaga:

$$\dot{E}_{Betz} = \frac{16}{27} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_1^3 \cdot (2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr) \quad (4.25)$$

Ova količina energije bit će izdvojena pomoću n lopatica. Mehanička snaga kružnog prstena računa se pomoću jednadžbe:

$$dP = \underbrace{n}_{\substack{\text{broj} \\ \text{lopatica}}} \cdot \underbrace{dU}_{\substack{\text{tan} \text{ gencija} \text{ ln} a \\ \text{komponenta} \\ \text{aerodinamičke} \\ \text{sile}}} \cdot \underbrace{\omega \cdot r}_{\substack{\text{loka} \text{ ln} a \\ \text{obodna} \\ \text{brzina}}} \quad (4.26)$$

Budući da se prilikom konstruiranja profila teži što većem koeficijentu ε ($c_D \ll c_L$), tangencijalna

sila u jednadžbi (4.22) sastoji se gotovo samo od sile uzgona dL :

$$dU \approx dL \cdot \cos \gamma = \frac{\rho}{2} \cdot c_L \cdot w^2 \cdot c(r) dr \cdot \cos \gamma \quad (4.27)$$

Mehanička snaga sada se može napisati u sljedećem obliku:

$$dP \approx n \cdot \omega \cdot r \cdot \frac{\rho}{2} \cdot c_L \cdot w^2 \cdot c(r) dr \cdot \cos \gamma \quad (4.28)$$

Ukoliko se izjednače jednadžbe (4.25) i (4.28) dobit će se jednadžba za duljinu tetive optimalno konstruirane vjetroturbine:

$$c(r) = \frac{1}{n} \cdot \frac{16}{27} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{c_L} \cdot \frac{v_1^3}{w^2 \cdot \omega \cdot r \cdot \cos \gamma} \quad (4.29)$$

Uvrštavanjem već prije izvedenih trigonometrijskih relacija:

$$v_1 = \frac{3}{2} \cdot w \cdot \cos \gamma; \quad u = \omega \cdot r = w \cdot \sin \gamma$$

dobije se:

$$c(r) = \frac{1}{n} \cdot 2 \cdot \pi \cdot R \cdot \frac{8}{9 \cdot c_L} \cdot \frac{1}{\lambda_D \sqrt{\lambda_D^2 \cdot \left(\frac{r}{R}\right)^2 + \frac{4}{9}}} \quad (4.30)$$

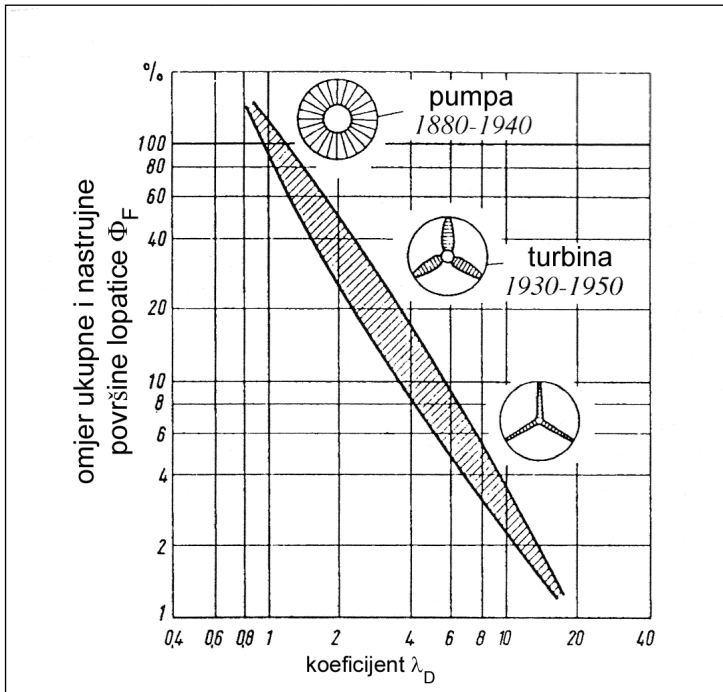
gdje su λ_D i c_L unaprijed određeni koeficijenti. Koeficijent c_L može, ali i ne mora, biti konstantan duž polumjera r . Uobičajeno je da se odabere koeficijent c_L koji će dati što veći koeficijent ε tj.

$$\left. \begin{array}{l} c_L = 0.6 \div 1.2 \\ \alpha_A = 2 \div 6^\circ \end{array} \right\} \varepsilon = \frac{c_L}{c_D} = \varepsilon_{\max}$$

Jednadžba (4.30) može se napisati u obliku:

$$c(r) = \frac{2 \cdot \pi \cdot R}{n} \cdot \frac{8}{9} \cdot \frac{1}{c_L \cdot \lambda_D^2 \cdot \frac{r}{R}} \quad (4.31)$$

ali samo u slučaju brzohodnih vjetroturbina ($\lambda_D \geq 3$). Očigledno je da je duljina tetive potrebna za izdvajanje snage po Betzu obrnuto proporcionalna kvadratu omjera brzina λ_D . Slika 67. prikazuje omjer ukupne i nastrojene površine lopatice, ovisno o omjeru brzina λ_D



Slika 67. Omjer ukupne i nastrojene površine lopatice, i ovisno o omjeru brzina λ_D [3]

Jednadžba za kut zakreta lopatice:

$$\beta(r) = \gamma(r) + \alpha_A(r) \quad (4.32)$$

Iz jednadžbe (4.19) slijedi:

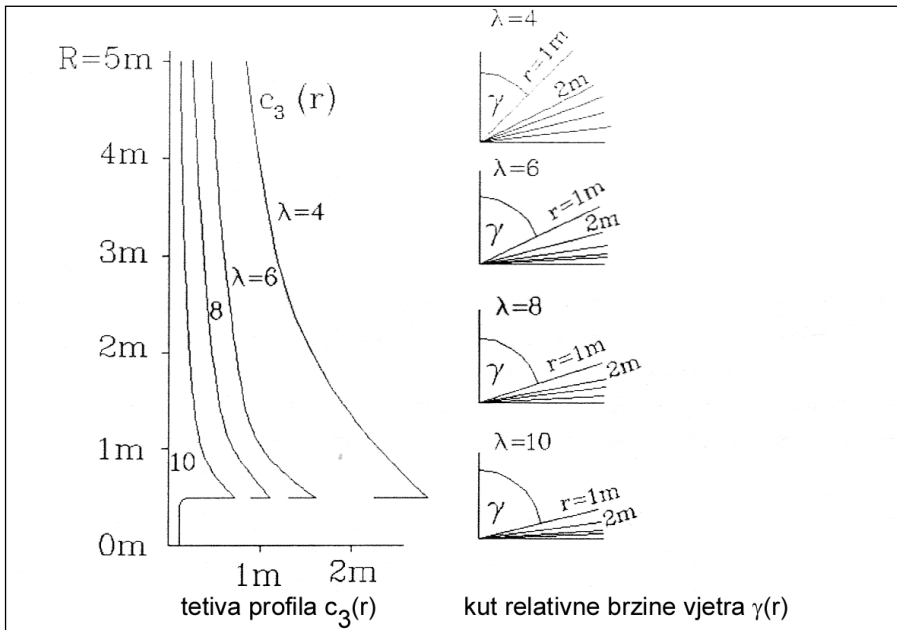
$$\gamma = \arctg\left(\frac{3}{2} \cdot \frac{r}{R} \cdot \gamma \cdot \lambda_D\right) \quad (4.33)$$

Osim kuta relativne brzine vjetra γ , prilikom određivanja kuta zakreta lopatice mora se uzeti u obzir i napadni kut α_A , jer o njemu ovisi odabrani koeficijent uzgona c_L , na temelju kojega se potom određuje duljina tetive profila.

Stoga slijedi:

$$\beta(r) = \arctg\left(\frac{3}{2} \cdot \frac{r}{R} \cdot \alpha_A \cdot \lambda_D\right) + \alpha_A \quad (4.34)$$

Slika 68. prikazuje duljinu tetive profila $c(r)$ i koeficijent λ_D za rotor s tri lopatice po Betzu



Slika 68. Duljina tetive profila $c(r)$ i koeficijent λ_D za rotor s tri lopatice po Betzu [3]

4.6. Gubitci

Betzov koeficijent snage $c_{p,Betz} = \frac{16}{27} = 0.59$ može se postići samo u idealnim uvjetima.. Jedini gubitak koji je uzet u obzir pri njegovu izračunu je gubitak brzine nakon prolaska kroz ravninu rotora. Postoje, međutim, i drugi gubitci:

1. profilni gubitci kao rezultat otpora lopatice zanemareni u jednadžbi (4.28);
2. gubitci na rubovima profila kao rezultat razlike tlaka (pozitivan tlak na donjoj strani lopatice i negativan tlak na gornjoj strani lopatice);
3. gubitci vrtloga kao posljedica obodne komponente brzine koja se javlja nakon prolaska kroz ravninu rotora.

4.6.1. Profilni gubitci

Profilni gubitci su posljedica sile otpora koja se javlja na profilu. U slučaju pretpostavke idealne geometrije lopatice mogu se zanemariti, no moraju se uzeti u obzir pri proračunu stabilnosti. Jednadžbe (4.22) i (4.26) pokazuju stvarnu snagu na elementu lopatice:

$$dP = n \cdot \omega \cdot r \cdot dU = n \cdot \omega \cdot r \cdot \left(\frac{\rho}{2} \cdot w^2 \cdot c \cdot dr \cdot c_L \cdot \cos \gamma - c_D \cdot \sin \gamma \right) \quad (4.35)$$

U gornjoj jednadžbi je u obzir uzeta sila otpora, dok bi u slučaju idealne turbine ($c_D = 0$) snaga bila:

$$dP_{id} = n \cdot \omega \cdot r \cdot \frac{\rho}{2} \cdot w^2 \cdot c \cdot dr \cdot c_L \cdot \cos \gamma \quad (4.36)$$

Iz omjera ovih dviju snaga dP / dP_{id} izvodi se jednadžba za iskoristivost profila:

$$\eta_{prof} = 1 - \frac{c_D}{c_L} \cdot \operatorname{tg} \gamma = 1 - \frac{1}{\varepsilon} \cdot \operatorname{tg} \gamma = 1 - \frac{3}{2} \cdot \frac{r}{R} \cdot \frac{\lambda_D}{\varepsilon} \quad (4.37)$$

a profilni gubitci su:

$$\zeta_{prof} = \frac{3}{2} \cdot \frac{r}{R} \cdot \frac{\lambda_D}{\varepsilon} \quad (4.38)$$

Iz gornje jednadžbe je vidljivo da se gubitci povećavaju prema vrhu lopatice. Zbog toga bi profili na vanjskim polumjerima lopatice trebali biti što boljeg kvaliteta, tj. $\varepsilon_{\max} \geq 50$. Profili bliže korijenu lopatice ne moraju zadovoljavati taj uvjet.

Za lopatice konstantnog profila i konstantnog napadnog kuta koeficijent ε nije funkcija od r . U tom slučaju se jednadžba za snagu izvodi integracijom po čitavoj visini lopatice:

$$P = \frac{16}{27} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_1^3 \cdot \int_0^R \eta_{prof} \cdot 2\pi \cdot r \cdot dr = \frac{16}{27} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_1^3 \cdot \int_0^R \left(1 - \frac{3}{2} \cdot \frac{r}{R} \cdot \frac{\lambda_D}{\varepsilon} \right) \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr; \quad (4.39)$$

$$P = \frac{16}{27} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v_1^3 \cdot \left(1 - \frac{\lambda_D}{\varepsilon} \right)$$

U ovom slučaju omjer $\frac{\lambda_D}{\varepsilon}$ predstavlja ukupni gubitak uslijed sile otpora.

4.6.2. Gubitci na vrhu

Gubitci na vrhu nastaju kao posljedica strujanja zraka s donje strane na gornju stranu profila (iz područja višeg na područje nižeg tlaka). Iz tog se razloga sila uzgona smanjuje prema vrhu lopatice. Posljedica ovoga je nastanak divergentnog vrtloga iza lopatice.

Što je lopatica tanja, to više nalikuje na lopaticu beskonačne duljine ($R/c = \infty$), pa se ovaj tip gubitaka povećava s povećanjem odnosa R/c .

Kako bi izračunao ove gubitke, Betz uvodi pojam efektivnog promjera:

$$D' = D - 0.44 \cdot b \quad (4.40)$$

gdje b predstavlja projekciju udaljenosti $a = \frac{\pi \cdot D}{n}$ (koraka između lopatica) u ravnini okomitoj na relativnu brzinu vjetra w i iznosi:

$$b = \frac{\pi \cdot D}{n} \cos \gamma \quad (4.41)$$

Iz trokuta brzina otprije su poznate relacije:

$$v_2 = w \cdot \cos \gamma; \quad w^2 = (\omega \cdot r)^2 + v_2^2; \quad v_2 = \frac{2}{3} \cdot v_1$$

pa izraz za efektivni promjer glasi:

$$D' = D \cdot \left(1 - 0.44 \cdot \frac{2 \cdot \pi}{3 \cdot n} \cdot \frac{1}{\sqrt{\lambda_D^2 + \frac{4}{9}}} \right) \quad (4.42)$$

Pošto je snaga proporcionalna kvadratu promjera, iskoristivost koja uzima u obzir strujanje oko vrha profila može se izračunati prema:

$$b = \frac{\pi \cdot D}{n} \cos \gamma \quad (4.41)$$

$$\eta_{vrh} = \left(\frac{D'}{D} \right)^2 = \left(1 - \frac{0.92}{\sqrt{\lambda_D^2 + \frac{4}{9}}} \right)^2 \quad (4.43)$$

Za slučaj vjetroturbina s $\lambda_D \geq 2$ gornja jednačba se bitno pojednostavljuje:

$$\eta_{vrh} \approx 1 - \frac{1.84}{n \cdot \lambda_D} \quad (4.44)$$

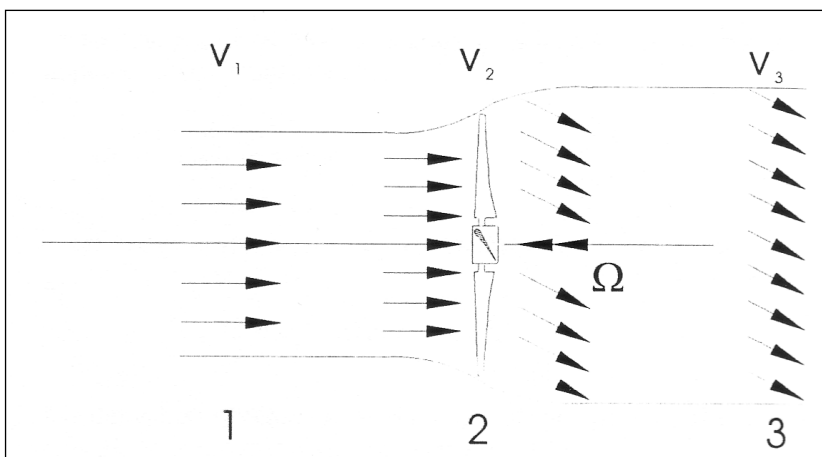
Jednostavno govoreći, član $\zeta_{vrh} \approx \frac{1.84}{n \cdot \lambda_D}$ predstavlja gubitak zbog prestrujavanja zraka oko vrhova lopatica..

4.7. Schmitzova teorija

Jedna od Betzovih pretpostavki je da prilikom prolaska kroz rotor ne dolazi do promjene smjera vektora brzine, tj. smjer ostaje aksijalan.

Schmitz uzima u obzir i promjenu smjera, pojavljuje se i tangencijalna komponenta kao neizbježna posljedica zakona akcije i reakcije. Tok se otklanja od aksijalnog smjera i izlazi s vrtlogom.

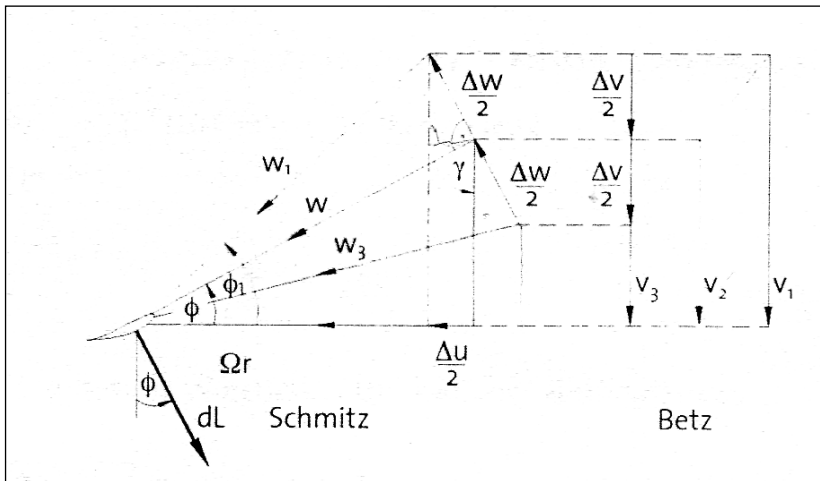
Dovoljno daleko ispred ravnine rotora, obodna (tangencijalna) komponenta brzine ima iznos nula, dok je njezin iznos dovoljno daleko iza ravnine rotora jednak Δu (slika 69.).



Slika 69. Strujanje zraka s obodnom komponentom brzine Δu [3]

Iz slike 70. vidljivo je da se sada relativna brzina vjetra w sastoji od aksijalne brzine vjetra v_2 i obodne komponente brzine u .

$$u = \omega \cdot r + \frac{\Delta u}{2} \quad (4.45)$$



Slika 70. Trokuti brzina dovoljno daleko ispred ravnine rotora (indeks 1), u ravnini rotora (bez indeksa), te dovoljno daleko iza ravnine rotora (indeks 3) i kut relativne brzine vjetra ϕ u ravnini vrtnje [3]

Kako se tangencijalna komponenta javlja tek nakon prolaska kroz ravninu rotora, koristi se srednja vrijednost brzine "prije" i "poslije", tj. $\Delta u/2$. Vrijednost Δu , u slučaju optimalnog izdvajanja snage iz vjetra zavisi o omjeru brzina λ_D .

Umjesto kuta γ koji se mjeri od osi stroja, za određivanje smjera relativne brzine vjetra koristi se kut ϕ , mjerjen od ravnine vrtnje tj. $\phi = 90 - \gamma$.

Trokut brzina (v_1, w_r, w_1, ϕ_1) nastao bi u slučaju da se brzina vjetra nakon prolaska kroz rotor uopće ne bi smanjila.

Promjena smjera Δw između w_1 (relativna brzina vjetra dovoljno daleko ispred rotora) i w_3 (relativna brzina vjetra dovoljno daleko iza rotora) proizlazi iz teorije profila. Ukoliko ne bi postojale sile trenja i viskoznosti, vrijedila bi jednadžba $|w_1| = |w_3|$. Jedina promjena je promjena smjera.

Sila u ravnini rotora za kružni prsten računa se pomoću jednadžbe:

$$dL = \Delta w \cdot d\dot{m} \quad (4.46)$$

i okomita je na vektor relativne brzine w .

Izraz za maseni proto kroz kružni prsten je:

$$d\dot{m} = 2 \cdot \rho \cdot \pi \cdot r \cdot v_2 \cdot dr \quad (4.47)$$

Snaga kružnog prstena, uz zanemarivanje sile otpora je:

$$dP = dM \cdot \omega = dU \cdot r \cdot \omega = dL \cdot r \cdot \omega \cdot \sin \phi \quad (4.48)$$

Iz slike 70. slijede trigonometrijske relacije za relativnu brzinu, aksijalnu brzinu i promjenu relativne brzine u ravnini rotora:

$$\begin{aligned} w &= w_1 \cdot \cos(\phi_1 - \phi); \\ v_2 &= w \cdot \sin \phi = w_1 \cdot \cos(\phi_1 - \phi) \cdot \sin \phi; \Delta w = 2 \cdot w_1 \cdot \sin(\phi_1 - \phi) \end{aligned} \quad (4.49)$$

Snaga izražena preko kuta ϕ glasi:

$$\begin{aligned} dP &= r \cdot \omega \cdot dm \cdot \Delta w \cdot \sin \phi = r \cdot \omega \cdot \rho \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr \cdot w_1 \cdot \cos(\phi_1 - \phi) \cdot \sin \phi \cdot 2 \cdot w_1 \cdot \sin(\phi_1 - \phi) \cdot \sin \phi \\ dP &= r^2 \cdot \omega \cdot \rho \cdot 2\pi \cdot dr \cdot w_1^2 \cdot \sin[2 \cdot (\phi_1 - \phi)] \cdot \sin^2 \phi \end{aligned} \quad (4.50)$$

Izjednačavanjem derivacije gornje funkcije s nulom, dobije se relacija:

$$\phi = \frac{2}{3} \cdot \phi_1 \quad (4.51)$$

kao optimalni kut relativne brzine vjetra, gdje je

$$\operatorname{tg} \phi_1 = \frac{v_1}{\omega \cdot r} = \frac{R}{\lambda_D \cdot r} \quad (4.52)$$

Uvrštavanjem jednadžbe (4.51) u jednadžbu (4.46) slijedi:

$$\begin{aligned} dL &= \Delta w \cdot dm = 2\pi \cdot r \cdot \rho \cdot dr \cdot w_1^2 \cdot \cos(\phi_1 - \phi) \cdot \sin \phi \cdot 2 \cdot w_1 \cdot \sin(\phi_1 - \phi) \\ dL &= 2\pi \cdot r \cdot \rho \cdot dr \cdot w_1^2 \cdot 4 \cdot \sin^2\left(\frac{\phi_1}{3}\right) \cdot \cos^2\left(\frac{\phi_1}{3}\right) \end{aligned} \quad (4.53)$$

Ukoliko se po teoriji profila izračuna duljina tetive profila koji će proizvesti silu uzgona,

$$dL = \frac{\rho}{2} \cdot w^2 \cdot c_{tot} \cdot dr \cdot c_L$$

dobivamo:

$$c_{tot}(r) = \frac{16 \cdot \pi \cdot r}{c_L} \cdot \sin^2\left(\frac{\phi_1}{3}\right) \quad (4.54)$$

odnosno za n lopatica:

$$c_{tot}(r) = \frac{1}{n} \cdot \frac{16 \cdot \pi \cdot r}{c_L} \cdot \sin^2\left(\frac{\phi_1}{3}\right) \quad (4.55)$$

Zakret lopatice dobije se kao razlika između kuta relativne brzine vjetra ϕ i napadnog kuta α_A :

$$\beta = \phi - \alpha_A \quad (4.56)$$

4.7.1. Gubit ci uslijed vrtloga

Gubtci uslijed vrtloga nastaju kao posljedica okretnog momenta u ravnini vrtnje. Prema zakonu akcije i reakcije, obodna (tangencijalna) sila dU pri povećanju polumjera r stvara protuvrtlog u strujanju iza ravnine rotora. Što je koeficijent λ_D manji, to je protuvrtlog veći.

Turbine s visokim omjerom λ_D izdvajaju snagu na račun velike kutne brzine ω i malog okretnog momenta $r dU$, dok je kod turbina s niskim omjerom λ_D situacija obrnuta. Dakle, gubitci u strujanju iza rotora nisu samo posljedica brzine v_3 već i obodne brzine u .

Za vjetroturbine s $\lambda_D \geq 3$, ovi gubtci su gotovo zanemarivi. S druge strane maksimalna vrijednost koju dosežu vjetroturbine s $\lambda_D \approx 1$ je $c_{p,Betz} = 0.42$. Ovdje nisu uzeti u obzir profilni i vršni gubitci.

Prema Betzovojj teoriji maksimalna izdvojena snaga iznosi:

$$P_{Betz} = \frac{\rho}{2} \cdot v_1^3 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot c_{p,Betz}; \quad c_{p,Betz} = \frac{16}{27} = 0.59$$

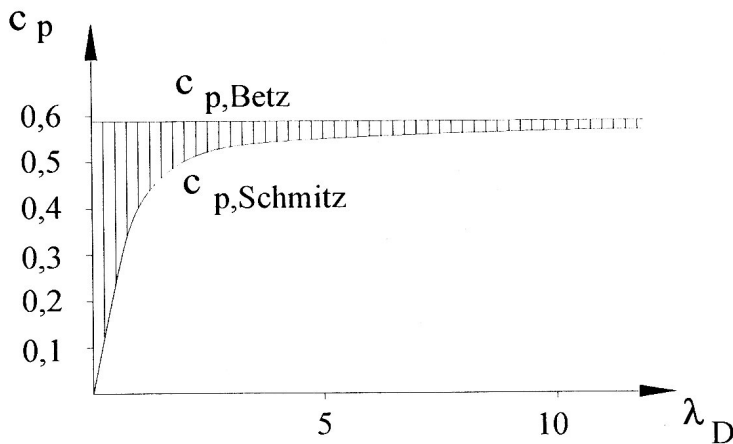
(Ovdje nije uzet u obzir vrtlog koji nastaje prilikom prolaska kroz ravninu rotora).

Prema Schmitzovoj teoriji (uzimajući u obzir gubitke vrtloga koji se javlja prilikom prolaska zraka kroz rotor) izdvojena snaga iznosi:

$$P_{Schmitz} = \frac{\rho}{2} \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v_1^3 \cdot \int_0^1 4 \cdot \lambda_D \cdot \left(\frac{r}{R}\right)^2 \cdot \frac{\sin^3\left(\frac{2}{3} \cdot \phi_1\right)}{\sin^2(\phi_1)} \cdot d\left(\frac{r}{R}\right) \quad (4.57)$$

$$\text{gdje je: } \phi_1 = \arctg\left(\frac{R}{\lambda_D \cdot r}\right)$$

Gornji se integral može riješiti analitički, no rješenja se najčešće daju u obliku dijagrama (slika 71.). Iz dijagrama je vidljivo da je Schmitzov koeficijent snage $c_{p,Schmitz}$, za razliku od Betzova koeficijenta snage $c_{p,Betz}$, u direktnoj vezi s omjerom brzina λ_D .



Slika 71. Koeficijent snage prema Betzu (bez) i Schmitzu (uz uzimanje u obzir vrtloga) - iscrtano područje predstavlja dodatne gubitke [3]

4.8. Konstruiranje vjetroturbina u praksi

Maksimalna snaga koja se može očekivati iz vjetroturbine je:

$$P_{stv} = \frac{\rho}{2} \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v_1^3 \cdot c_{p,stv} \quad (4.58)$$

$$\text{gdje je: } c_{p,stv} = c_{p,Schmitz}(\lambda_D) \eta_{prof}(\lambda_D, \varepsilon) \eta_{vrh}(\lambda_D, n)$$

Iz gornje jednadžbe se vidi da koeficijent $c_{p,stv}$ ovisi o omjeru brzina λ_D , omjeru $\varepsilon = \frac{c_L}{c_D}$ odabranog profila, te o broju lopatica (o broju lopatica ovisi iznos vršnih gubitaka).

Hütterov dijagram koji je prikazan na slici 4.13. daje približnu informaciju o potrebnoj površini lopatica. Vidljivo je da se potrebna površina značajno smanjuje povećanjem omjera brzina λ_D .

Nakon što se odredi omjer brzina λ_D , računa se duljina tetive profila $c(r)$ te kutovi relativne brzine vjetra $\phi(r)$. Iz odabranog kuta α_A i koeficijenta c_L dobije se kut zakreta profila. Kut zakreta profila prema

Schmitzovoj teoriji iznosi:

$$\beta = \frac{2}{3} \cdot \operatorname{arctg} \left(\frac{R}{\lambda_D \cdot r} \right) - \alpha_A \quad (4.59)$$

U jednom se trenutku mora odrediti i broj lopatica. Spomenute teorije pružaju o tome vrlo malo podataka. . Taj parametar se spominje samo pri izračunu vršnih gubitaka. pa presudnu ulogu pri izboru broja lopatica imaju ekonomski čimbenici, dinamičke činjenice (rotori s 3 lopatice lakše se vrte, dok su rotori s 1 i 2 lopatice puno bučniji) i pitanje čvrstoće.

Koeficijent c_L ne mora biti konstantan duž čitavog polumjera (visine lopatice). Porast duljine tetive profila, prema teorijama Betza i Schmitza gotovo je linearan.

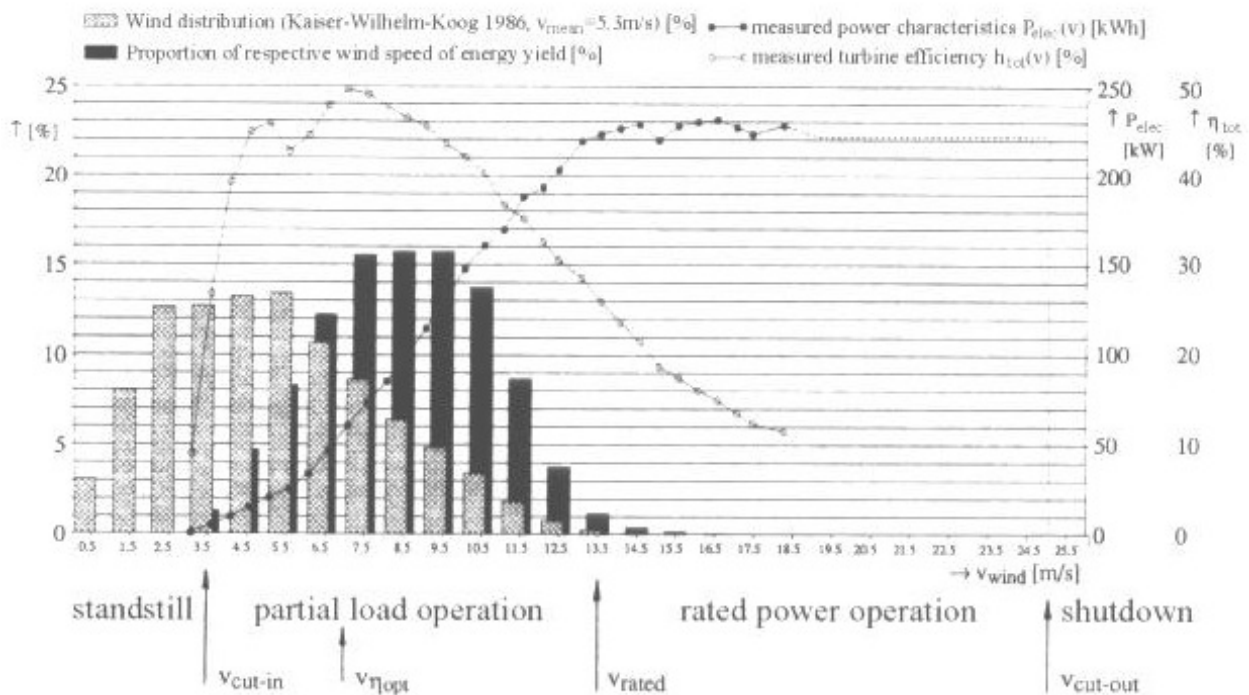
5. Sustav nadzora, zaštite i regulacija snage

Drugo važno rješenje koje mora donijeti konstruktor u vezi konstrukcije jest nadzorni sustav [3, 11-13]. . To je u biti tehničko sučelje između primjene ili načina rada i konstrukcije vjetroturbine .

Koncept nadzornog sustava ne obuhvaća samo nadzor parametara režima rada vjetroturbine nego i sve mjere koje se odnose na ograničenje i regulaciju izlazne snage i zaštite turbine, npr. na koji način regulirati izlaznu snagu, pasivno - prekidom strujanja ili aktivno - zakretanjem lopatica.

Nadzorni sustav je od velike važnosti za konstrukciju vjetroturbine, jer su veliki dio radnog i vršnog opterećenja na komponente uvjetovani njegovim radom. Opterećenje na stup, u slučaju ekstremnih vjetrova, jako ovisi o sigurnosnom konceptu turbine.

Većina vjetroturbina koristi programski kontroliranu elektroniku u svom nadzornom sustavu. U pravilu, ona dijeli rad vjetroturbine u četiri radna područja (slika 72.) i ovisno o brzini vjetra kontrolira prijelaz između tih režima, kao i povezane funkcije turbine: oslobađanje rotora, startanje, sinkronizaciju mreže, spajanje generatora, zakretanje, kontrolu izlazne snage i isključivanje.



Slika 72. Karakteristika vjetroturbine s karakterističnim radnim područjima [3]

Tipične brzine vjetrova na visini glavine (***) glavčine???) rotora za rad vjetroturbine:

- minimalna brzina 3.5 m/s ($v_{\text{cut-in}}$);
- nazivna brzina 13.5 m/s (v_{rated});
- maksimalna brzina 25 m/s ($v_{\text{cut-off}}$);
- brzina preživljavanja cca 70 m/s.

Raspodjela vjetrova prikazana na slici 72. prikazuje da vjetroturbina, ovisno o položaju i vrsti turbine, radi i do 75% vremena u režimu djelomičnog opterećenja, tj. bez regulacije izlazne snage. Ostalih 25%, turbina je isključena, ili radi u režimu tzv. nominalne snage, tj. s regulacijom izlazne snage (npr. regulacijom koraka lopatica). Za mnoge lokacije rad u režimu nominalne snage teško da je iznad 10% ukupnog vremena. Udio olujnih vjetrova (>20 m/s) je izrazito nizak. Vjetroturbine su obično isključene uslijed takvih ekstremnih uvjeta vjetrova, jer oni uzrokuju velika opterećenja na turbini.

Nadzorni sustav ne kontrolira samo miran i normalan rad, već i procesuiru ručne zahvate, i zaustavlja turbinu u slučaju kvara ili nepravilnosti koje su »prijavljene« velikim brojem senzora i nadzornih uređaja. To mogu biti: prekoračenje sigurne maksimalne brzine rotora, prevelike oscilacije gondole i stupa, smanjenje tlaka u hidrauličkim komponentama, ispadanje iz električne mreže, nizak napon u bateriji nadzornog sustava, prevelika snaga, rad izvan faze, smetnje mreže (npr. frekvencija), prevelika temperatura generatora, reduktora ili pogona za zakretanje, promjena omjera brzine vrtnje generatora i rotora, mala brzina zakretanja lopatica, pogrešan smjer rotacije rotora, niska razina ulja u zupčanicima, nizak tlak ulja za podmazivanje, istrošenost kočione pločice, prljavi filter hidrauličkog ulja, preveliko izvijanje žice ...

Bez ikakvih dvojbi, nadzorni sustav je presudan za siguran rad vjetroturbine. Zbog toga su, sudeći po statistikama, greške ili kvarovi nadzornog sustava najčešći uzroci oštećenja.

5.1. Zaštita

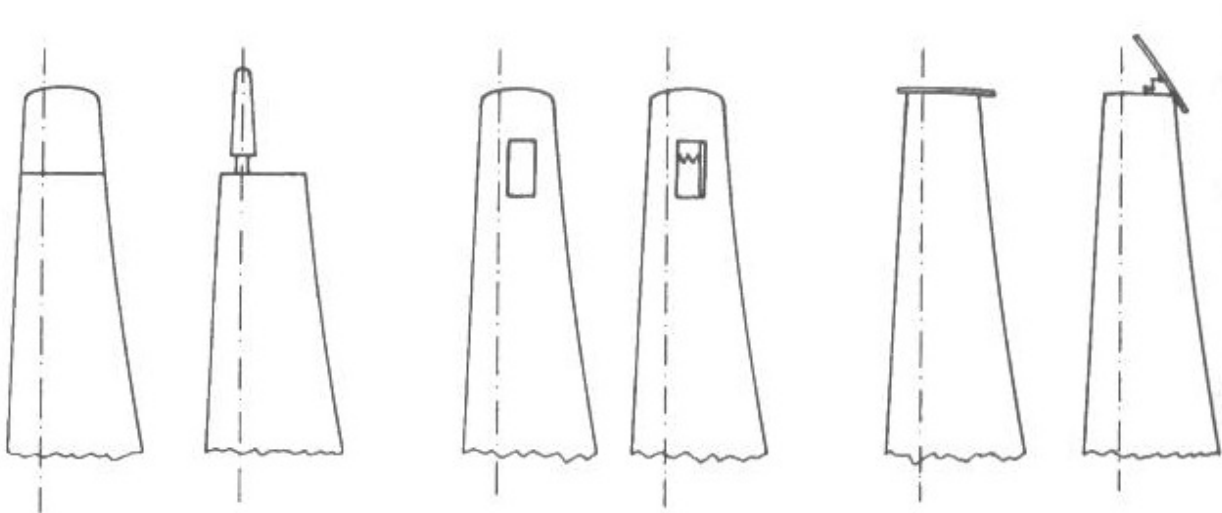
Prema smjernicama Germanische Lloyd, koji je ovlašten za certificiranje vjetroturbina, konstrukcija mora izdržati 50 godina brzine vjetra do 56 m/s ili nalete vjetra do 70 m/s također 50 godina (deset minuta ili prosječno 5 sekundi, na visini glavine*** glavčine??). Nije moguće dimenzionirati sve komponente vjetroturbine da bi mogle iskoristiti veliki potencijal snažnih oluja. Cijena tih dodatnih dobitaka bila bi previsoka, uzimajući u obzir nekoliko incidenata zbog tako ekstremnih brzina vjetra, pa se zato vjetroturbine isključuju za vrijeme jakih vjetrova, Brzine pri kojima se turbine isključuju su 20-25 m/s.

Većina vjetroturbina koristi kočnice za isključivanje prilikom oluje, a one se aktiviraju preko kontrolne naredbe nadzornog sustava i djeluju mehanički na pogonsku vodilicu ili aerodinamički na rotor. Za vjetroturbine, s regulacijom snage zakretanjem lopatica, isključivanje za vrijeme nevremena može se smatrati 'ekstremnim ograničavanjem izlaza snage' i stanjem koje turbina postupno postiže s povećavanjem brzine vjetra. Turbina često nije sasvim zaustavljena, već je ostavljena samo da se okreće, tj. da radi pri vrlo maloj brzini vrtnje.

Razni načini isključivanja zbog nevremena imaju različite učinke na vršno opterećenje turbine. Neuspjelo (kasno) isključivanje u većini slučajeva dovodi do potpunog oštećenja turbine. Iz tog razloga međunarodna regulativa zahtijeva dva nezavisna sustava zaštite. Uobičajeni sustav, koji se često naziva radnom kočnicom, i dodatni, s hitnim kočionim sustavom.

Prva generacija danskih turbina koristila je mehaničku kočnicu kao radnu. Ona se nalazi direktno na glavnom vratilu. Prema načelu 'ograničenog otkazivanja', kočnica je hidraulički otpuštena od opruge. Na taj način se turbina uvijek isključi iz pogona ako dođe do pada tlaka u hidrauličkom sustavu (curenje, oštećenje napajanja hidrauličke pumpe ili kontrolne jedinice). Trenutno zaustavljanje tipično je za ovo nekontrolirano kočenje, i uzrokuje vršna opterećenja na vodilici, koja su nekoliko puta veća od radnih opterećenja.

U početku su aerodinamičke kočnice korištene kao kočnice za slučaj nužde: u slučaju prevelike brzine, mehanički centrifugalni mehanizam zakreće vrhove lopatica ili raspoređuje spojere, klapne, kako bi se povećavanjem otpora smanjila brzina vrtnje rotora (slika 73.). Kako pogonske aerodinamičke sile nastavljaju djelovati na preostalom dijelu lopaticice, aerodinamičke kočnice ne zaustavljaju rotor u cijelosti, već smanjuju njegovu brzinu vrtnje na sigurnu vrijednost. Zakretljivi vrhovi lopatica su u širokoj primjeni. Slabe centrifugalne sile, ili poddimenzioniranje kočionog mehanizma, uzrokovali su velika oštećenja na mnogim turbinama. Nesinkronizirana aktivacija kočnica na različitim lopaticama također je nepoželjna nuspojava takvog načina, jer uzrokuje aerodinamičku neujednačenost.

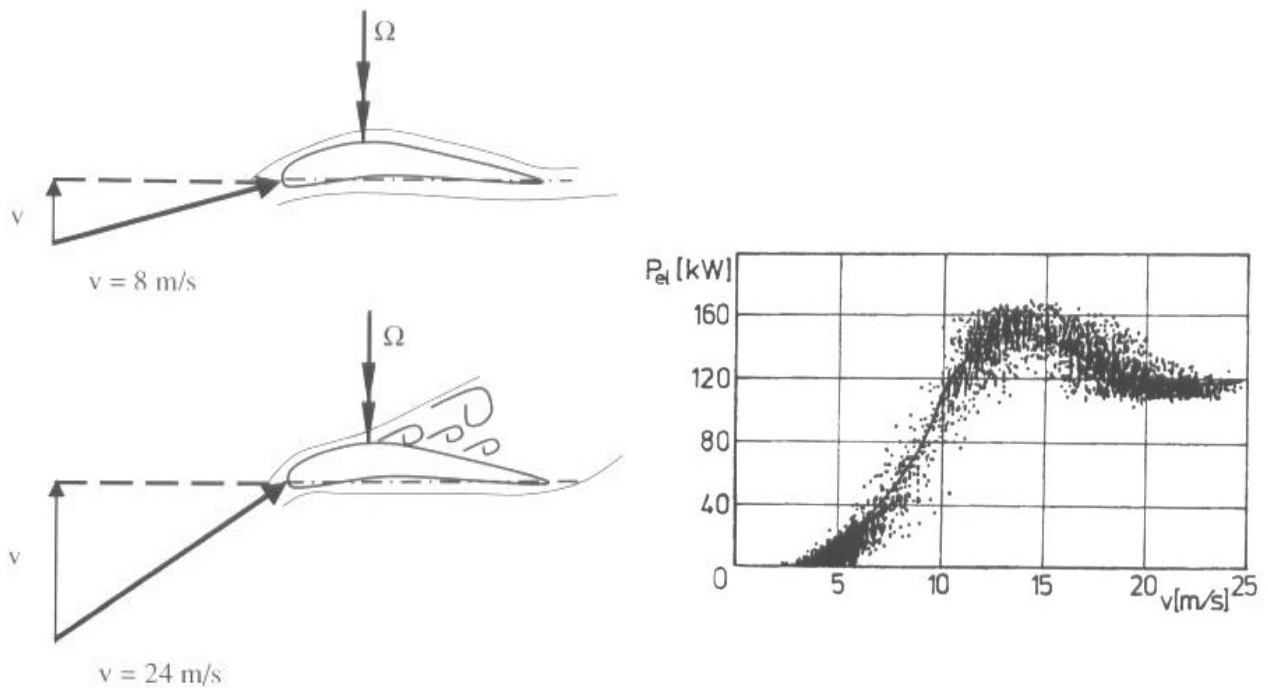


Slika 73. Različite aerodinamičke kočnice [3]

5.2. Regulacija snage

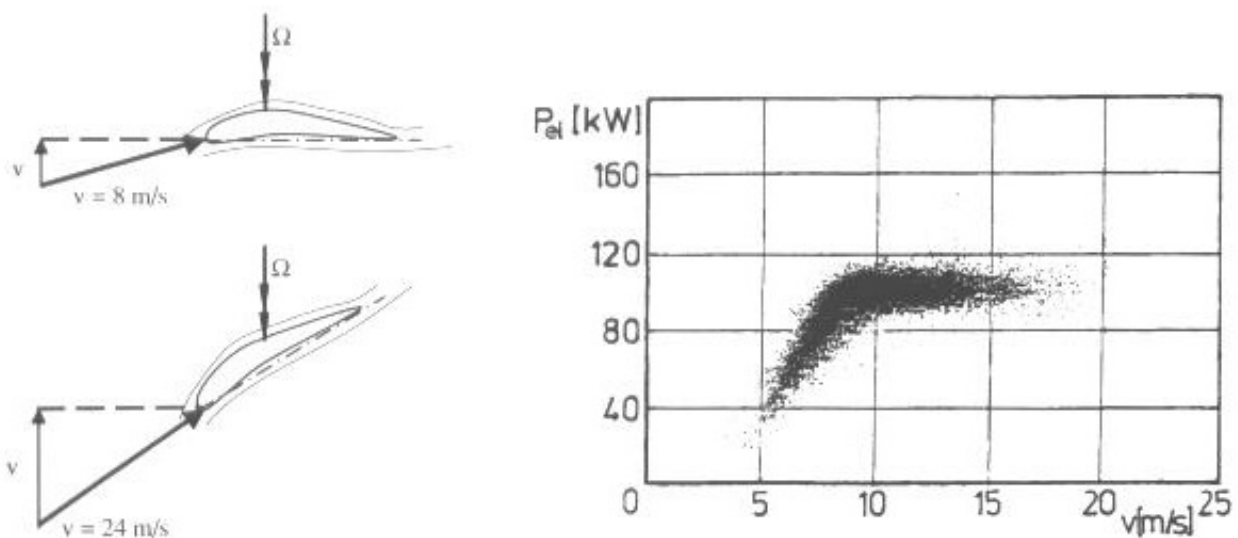
Metoda prekida strujanja ili zavjetrine (*eng. stalling*), ili metoda promjene koraka zakretanjem lopatica na električno-hidraulički odnosno mehanički način (*engl. pitching*), smanjuje pogonsku aerodinamičku silu na pojedinu lopaticu rotora. Većina turbina spojenih na električnu mrežu koristi relativno jednostavnu metodu prekida strujanja za regulaciju izlazne snage. To načelo zahtijeva konstantnu brzinu vrtnje turbine, tj. brzinu neovisnu o brzini vjetra, što se ostvaruje njezinim opterećenjem, npr. indukcijskim generatorom spojenim na mrežu. Na taj se način mijenjaju uvjeti nastujavanja zraka na lopaticu (dolazi do povećanja napadnog kuta) pa dolazi do odvajanja struje zraka (prekida strujanja, zagušenja) pri velikim brzinama vjetra. To dovodi do smanjenja aerodinamičkih sila i, postupno, izlazne snage rotora (slika 74. - lijevo).

Metoda prekida strujanja je kompliciran aerodinamički proces. Ne može se točno izračunati za nestacionarne uvjete u slobodnom polju vjetra. Taj problem se može izbjeći predimenzioniranjem turbine. Slika 74. – desno, grafički prikazuje izlaznu snagu tipičnu za turbine koje koriste metodu prekida strujanja.



Slika 74. Regulacija snage vjetroturbine prekidom strujanja (engl. stall) [3]

Vjetroturbine koje koriste mehanizam zakretanja lopatica su relativno brojnije. Po načelu zakretanja lopatica s obzirom na relativne uvjete vjeta, aerodinamičke sile se postupno smanjuju (povećanje napadnog kuta), tako da izlazna snaga rotora ostaje konstantna nakon postizanja nazivne snage (sl. 3.30.a). Dijagram na sl. 3.30.b je dobar primjer za turbinu koja koristi kontrolu zakretanja lopatica.



Slika 75. Regulacija snage vjetroturbine promjenom koraka (engl. pitch) [3]

Obje metode imaju svoje prednosti i nedostatke. Potisak rotora na stup i temelj, dosta je manji kod

turbina s regulacijom zakretanja lopatica. U načelu, to omogućuje smanjenje materijala i mase u primarnoj strukturi. Turbine, regulirane metodom prekida strujanja, moraju biti isključene čim se dostigne određena brzina vjetra (kočioni moment), dok se kod turbina s regulacijom zakretanja lopatica može postupno mijenjati režim vrtnje: na maksimalnom kutu zakreta (oko 70°), rotor radi u režimu bez opterećenja, tj. u praznom hodu. Iz različitih razloga su turbine s regulacijom zakretanja izložene manjim vršnim opterećenjima, i zato njihova konstrukcija može biti lakša i jeftinija.

Turbine s regulacijom zakretanja lopatica su skuplje od turbina s regulacijom prekida strujanja. Pošto prve daju bolje rezultate (više izdvojene kinetičke energije vjetra) na mjestima s nepovoljnijim uvjetima mogu se smatrati ekonomski učinkovitijima. Prednost turbina s regulacijom prekida strujanja je to što su u uvjetima jakih vjetrova, kad učinak prekida strujanja postane djelotvoran, oscilacije snage manje od onih kod turbina s regulacijom zakretanja u odgovarajućem regulacijskom režimu. Turbine regulirane zakretanjem lopatica s fiksnom brzinom vrtnje, i s indukcijskim generatorom spojenim na mrežu, moraju vrlo brzo reagirati na olujne vjetrove. Može se zaključiti da regulacija zakretanjem lopatica smanjuje statička vršna opterećenja, ali povećava dinamička.

Većina vjetroturbina spojenih na mrežu koristi elektronski reguliranu hidrauliku za zakretanje lopatica ili elektromotore.

Literatura

- [1] <https://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.ACCS.ZS>
- [2] <https://ember-climate.org/data/>
- [3] Gasch R., Twele J.: *Wind Power Plants, Fundamentals, Design, Construction and Operation*, Solarpraxis AG, 2002.
- [4] www.irena.org/Publications
- [5] GWEC – GLOBAL WIND REPORT 2023: <https://gwec.net/globalwindreport2023/>
- [6] https://hr.wikipedia.org/wiki/Vjetroelektrane_u_Hrvatskoj
- [7] Bloomberg New Energy Finance: <https://about.bnef.com/>
- [8] <https://www.vestas.com/en/products>
- [9] <https://pdf.directindustry.com/pdf/enercon/enercon-wind-turbines/20877-112605.html>
- [10] <https://en.wikipedia.org/wiki/Anemometer>
- [11] F. Maxwell, J.G. McGowan, A.L. Rogers, *Wind Energy Explained – Theory, Design and Application*, Wiley, 2001.
- [12] E. Hau, *Wind Turbines – Fundamentals, Technologies, Applications, Economics*, 2nd Edition, Elsevier 2004.
- [13] T. Burton, D. Sharper, N. Jenkins, E. Bossanyi, *Wind Energy Handbook*, Wiley 2005.

Kazalo slika

Slika 1. Udio elektrifikacije u pojedinim zemljama u % [1].....	4
Slika 2. Proizvodnja električne energije u svijetu u periodu od 1985.do 2022.godine iz različitih izvora [2].....	5
Slika 3 Udjeli pojedinih troškova u cijeni električne energije dobivene iz različitih izvora [3].....	7
Slika 4. Globalni udjeli pojedinih izvora energije (fosilnih i obnovljivih) u svjetskoj proizvodnji električne energije u 2022. godini [4]	8
Slika 5. Povijesni razvoj instalirane snage vjetroelektrana u GW u svijetu [5]	8
Slika 6. Neke od vjetroelektrana u Republici Hrvatskoj: Vrataruša - gore lijevo;Trtar-Krtolin - gore desno; Vrataruša - dolje lijevo [6].....	9
Slika 7. Razvoj veličine i jedinične snage komercijalno proizvedenih vjetroturbina između 1990. i 2025. [7].....	10
Slika 8. Pad cijene električne energije proizvedene u vjetroelektranama kao i u postrojenja na solarnu energiju u zadnjih desetak godina [4].....	10
Slika 9. Perzijska vjetrenjača [3]	11
Slika 10. Kineska vjetrenjača s rotirajućim "jedrima" [3]	12
Slika 11. Savoniusov rotor(a) i Darriesov rotor (b) [3]	13
Slika 12. Crtež stupne vjetrenjače iz Engleske u knjizi za molitve iz 12. s toljeća [3].....	14
Slika 13. Paltročkova vjetrenjača mlin kao najpoznatija u Nizozemskoj u 16. i 17. stoljeću [3]	14
Slika 14. Vjetrenjače parka Zaanse Schans (Nizozemska) imaju različite namjene: De Zoeker je uljara, De Kat bojadisaona, a De Gekroonde Poelenburg je pilana [3]	14
Slika 15. Mediteranska vjetrenjača-toranj s jedrima – rana verzija ovakvih vjetrenjača [3].....	15
Slika 16. P. La Courova vjetrenjača za proizvodnju električne energije [3]	16
Slika 17. Američka "farmerska" vjetrenjača za pumpanje vode [3].....	16
Slika 18. HÜTTEROVA turbina (100 kW; D= 34 m; NJEMAČKA 1958.) [3]	16
Slika 19. GEDSEROVA turbina (200 kW; D= 24 m; Danska 1957.) [3].....	16
Slika 20. GROWIAN (3000 kW; D= 100 m; NJEMAČKA 1982.) [3]	17
Slika 21. WTS-3 MAGLARP (3000 kW; D= 78 m; ŠVEDSKA 1982.) [3].....	17
Slika 22. EOLE C (4200 kW; D= 64 m; KANADA 1988.) [3]	17
Slika 23. WKA (1200 kW; D= 60 m; NJEMAČKA 1990.) [3]	17
Slika 24. GAMMA 60 (1500 kW; D= 60 m; ITALIJA 1992.) [3].....	17
Slika 25. MONOPTEROS (640 kW; D= 56 m; NJEMAČKA 1989.) [3].....	17
Slika 26. Vjetroturbina s asinkronim generatorom i konstantnom brzinom vrtnje (tzv. stall-controlled) [3].....	18
Slika 27. VESTAS V15-55 (55 kW; D= 15 m) [8]	18
Slika 28. VESTAS V27-225 (225 kW; D= 27 m) [8]	18
Slika 29. VESTAS (2000 kW; D= 52 m) [8]	19
Slika 30. VESTAS V110 (4200 kW; D= 150 m) [8].....	19
Slika 31. Vjetroturbina sa sinkronim generatorom i promjenjivom brzinom vrtnje (tzv. pitch-controlled) [3].....	20

Slika 32. N52 (1000 kW; D= 52 m; NJEMAČKA 1995.) [9].....	20
Slika 33. N133/4.8 (4800 kW; D= 133.2 m) [9]	20
Slika 34. N163/6X (6000 kW; D= 163 m) [9]	20
Slika 35. Shematski prikaz vjetroelektrane [3].....	21
Slika 36. Rossby-eva zračna struja [3].....	22
Slika 37. Hadley-eva zračna struja [3]	22
Slika 38. Granični sloj [3].....	23
Slika 39. Promjena brzine koja ovisi o udaljenosti od tla i visini hrapavosti [3].....	24
Slika 40. Priobalni vjetrovi: tijekom dana (lijevo) i tijekom noć (desno).....	25
Slika 41. Planinski vjetrovi: tijekom dana (lijevo) i tijekom noć (desno) [3].....	26
Slika 42. Katabatički vjetar [3].....	26
Slika 43. Poremećaj vjetra zbog šume [3]	27
Slika 44. Poremećaj vjetra zbog naselja [3].....	27
Slika 45. Anemometar s vjetrovnom (lijevo) i anemometar s lopaticama (desno) [10].....	28
Slika 46. Osnovni elementi vjetroturbine [3].....	30
Slika 47. Usporedba broja lopaticana rotoru sporohodnih i brzohodnih vjetroturbina [3]	32
Slika 48. Prikaz različitih profila po presjecima lopatice [3]	33
Slika 49. Pojednostavljenja lopatice korištenjem jednostavne geometrije [3]	33
Slika 50. Zamorna čvrstoća GFRP i CFRP (lijevo) i poprečni presjek 12 m duge lopatice (desno) [3]	34
Slika 51. Učvršćenje lopatica na glavčinu [3].....	35
Slika 52. Pogonska linija smještena u gondoli	36
Slika 53. Sustav zakretanja gondole.....	37
Slika 54. Stup vjetroagregata.....	38
Slika 55. Strujanje zraka brzinom v_1 kroz kontrolnu površinu A [3]	40
Slika 56. Strujanje zraka kroz idealni rotor vjetroturbine [3].....	40
Slika 57. Koeficijent snage c_p u zavisnosti o omjeru v_3/v_1 [3].....	42
Slika 58. Snaga vjetroturbina u zavisnosti o brzini vjetra i promjeru rotora [3]	42
Slika 59. Sila uzgona L i sila otpora D elementa lopatice širine b [3].....	43
Slika 60. Koeficijenti uzgona c_L i otpora c_D u zavisnosti o napadnom kutu α_A izmjereni u zračnom tunelu za profile NACA 4412 i 4424 [3]	44
Slika 61. Raspodjela brzine po profilu [3].....	45
Slika 62. Postavljanje referentne linije za određivanje napadnog kuta [3]	45
Slika 63. Koeficijent uzgona c_L i omjer c_D/c_L za neke Göttingove- profile [3]	46
Slika 64. Trokut brzina [3]	47
Slika 65. Trokuti brzina za različite poprečne presjeke [3].....	48
Slika 66. Aerodinamičke sile na element lopatice dr [3]	48
Slika 67. Omjer ukupne i nastrojene površine lopatice ovisno o omjeru brzina λ_D [3].....	51
Slika 68. Duljina tetive profila $c(r)$ i koeficijent λ_D za rotor s tri lopatice po Betzu [3].....	52
Slika 69. Strujanje zraka s obodnom komponentom brzine Δu [3]	55
Slika 70. Trokuti brzina dovoljno daleko ispred ravnine rotora (indeks 1), u ravnini rotora (bez indeksa), te dovoljno daleko iza ravnine rotora (indeks 3) i kut relativne brzine vjetra ϕ u ravnini vrtnje [3].....	56

Slika 71. Koeficijent snage prema Betzu (bez) i Schmitzu (uz uzimanje u obzir vrtloga) - iscrtano područje predstavlja dodatne gubitke [3]	59
Slika 72. Karakteristika vjetroturbine s karakterističnim radnim područjima [3]	61
Slika 73. Različite aerodinamičke kočnice [3]	63
Slika 74. Regulacija snage vjetroturbine prekidom strujanja (engl. stall) [3]	64
Slika 75. Regulacija snage vjetroturbine promjenom koraka (engl. pitch) [3]	64

Kazalo tablica

Tablica 1. Usporedba učinaka koje pojedina fosilna i ostala goriva imaju na okoliš [3].....	5
Tablica 2. Količina proizvedene energije po m ² korištenog zemljišta [3].....	6
Tablica 3. Energetska amortizacija različitih obnovljivih izvora energije [3]	6

Kazalo grafova

...

Popis ključnih pojmova

....

Impresum

Autori: Zvonimir Guzović

Lektor: Gordana Hajni

Recenzent: Damir Dović