



Plan / schedule



- 14.10. srijeda online 17h
- 21.10. srijeda online 15:45
- 22.10. četvrtak uživo 15:45
- Erasmus – first materials uploaded/send by mail - 11.10. Sunday



Tehnološke osnove iskorištavanja obnovljivih izvora energije

3. Vjetar - resursi



Nastajanje vjetra



- Vjetar je masa zraka u pokretu koji nastaje zbog razlike tlakova na površini zemlje kao posljedica različitog zagrijavanja pod utjecajem sunčeve energije – apsorpcija sunčeve energije je veća na ekvatoru nego na polovima
- Na tako nastalu masu zraka u pokretu uvelike utječu rotacija Zemlje (obodna brzina 600 km/h na ekvatoru i 0 na polovima) i konfiguracija tla
- Zrak se giba iz područja visokog tlaka u područje niskog tlaka; vertikalni gradijent tlaka uglavnom se poništava s gravitacijskom silom pa se zrak giba horizontalno
- Razumijevanje principa nastajanja vjetra bitno je za “inženjerski” pristup evaluaciji potencijalne lokacije vjetroelektrane, dizajn sustava i evaluaciju njegovih operativnih karakteristika
- Možemo razmatrati četiri sile: silu razlike tlakova, Coriolisovu silu, inercijalnu silu i silu trenja zemljine površine



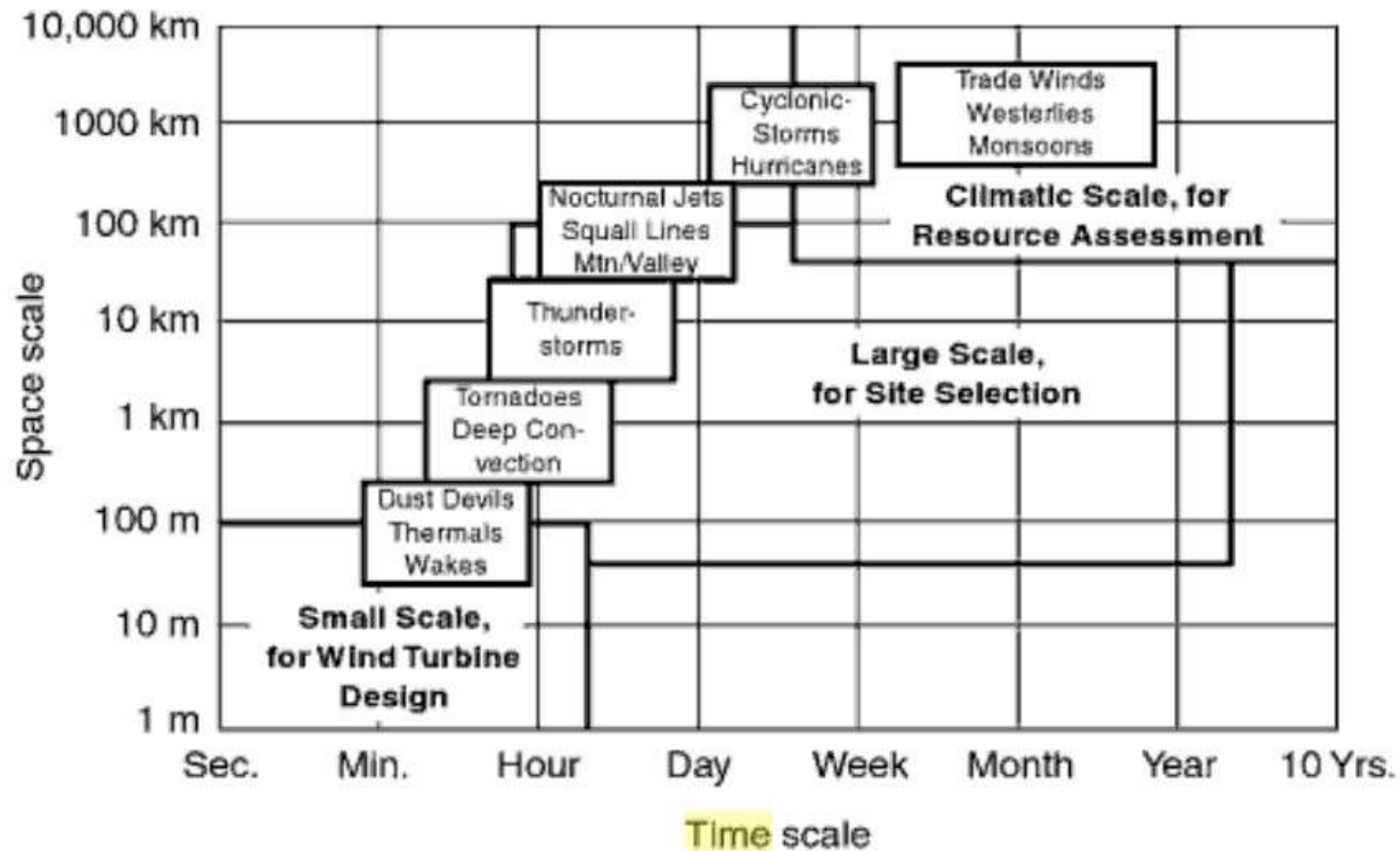
- Sila tlaka na jediničnu masu zraka,
- Coriolisova sila po jediničnoj masi (ω je kutna brzina rotacije Zemlje, a ϕ zemljopisna širina)
- Geostrofički vjetar
- Centrifugalna sila (izobare su krivulje),
- Trenje.

Idealizirana slika za “glatku” sfernu površinu

Za realnu sliku bitan je utjecaj konfiguracije tla i razlike u tipovima površine Zemlje (primjerice more i čvrsto tlo)

$$F_p = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial n}$$
$$F_C = f \cdot v; \quad f = 2\omega \sin(\Phi)$$
$$v_g = \frac{-1}{f \cdot \rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial n}$$
$$\frac{v_{gr}^2}{R^2} = -f \cdot v_{gr} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n}$$

☀️ Prostorno-vremenska skala atmosferskih kretanja ("Wind Energy Explained", Wiley, 2002) 📄

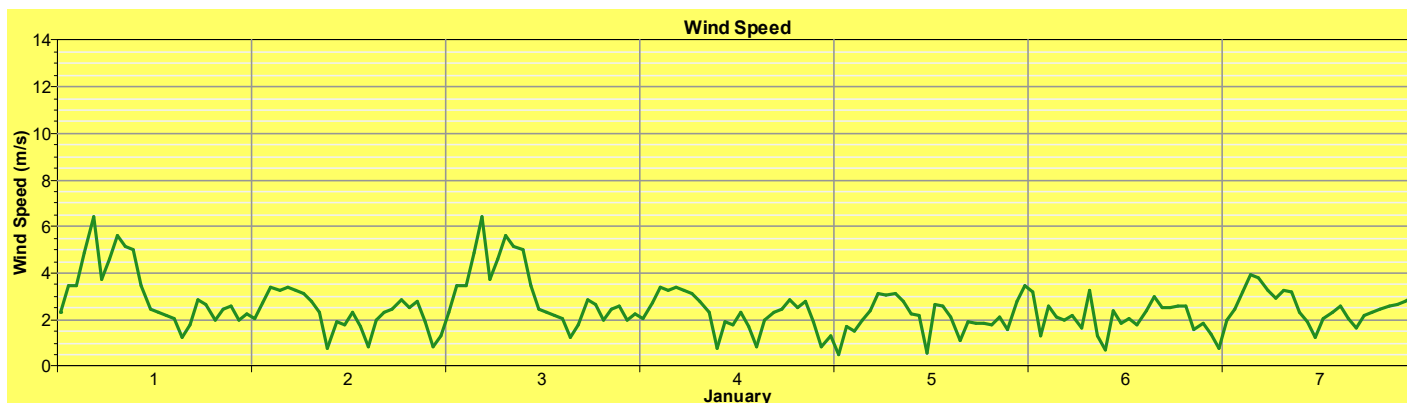




Varijacija vjetra u vremenu

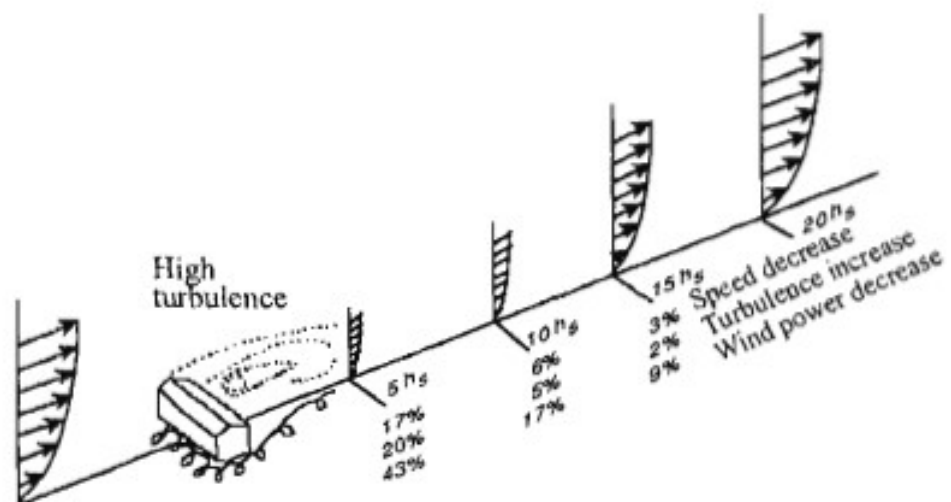
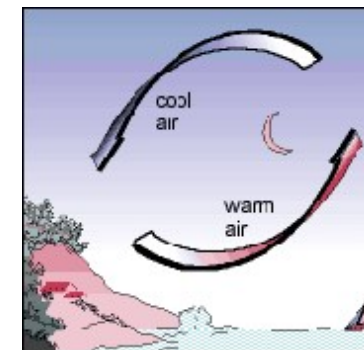
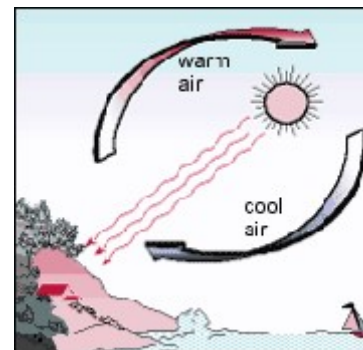
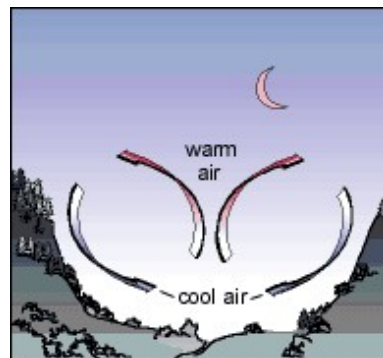
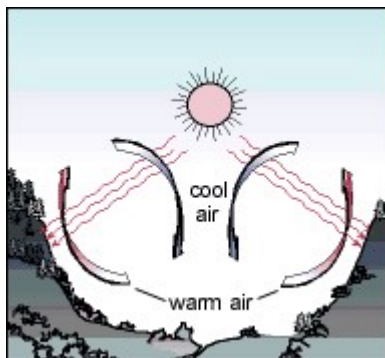


- Višegodišnja – utjecaj na dugoročnu proizvodnju vjetroagregata (30 god, 5 god, 1 god)
- Godišnja - sezonska
- U danu
- Kratkoročna – turbulencije i udari vjetra (10 min ili manje) – bitno za dizajn





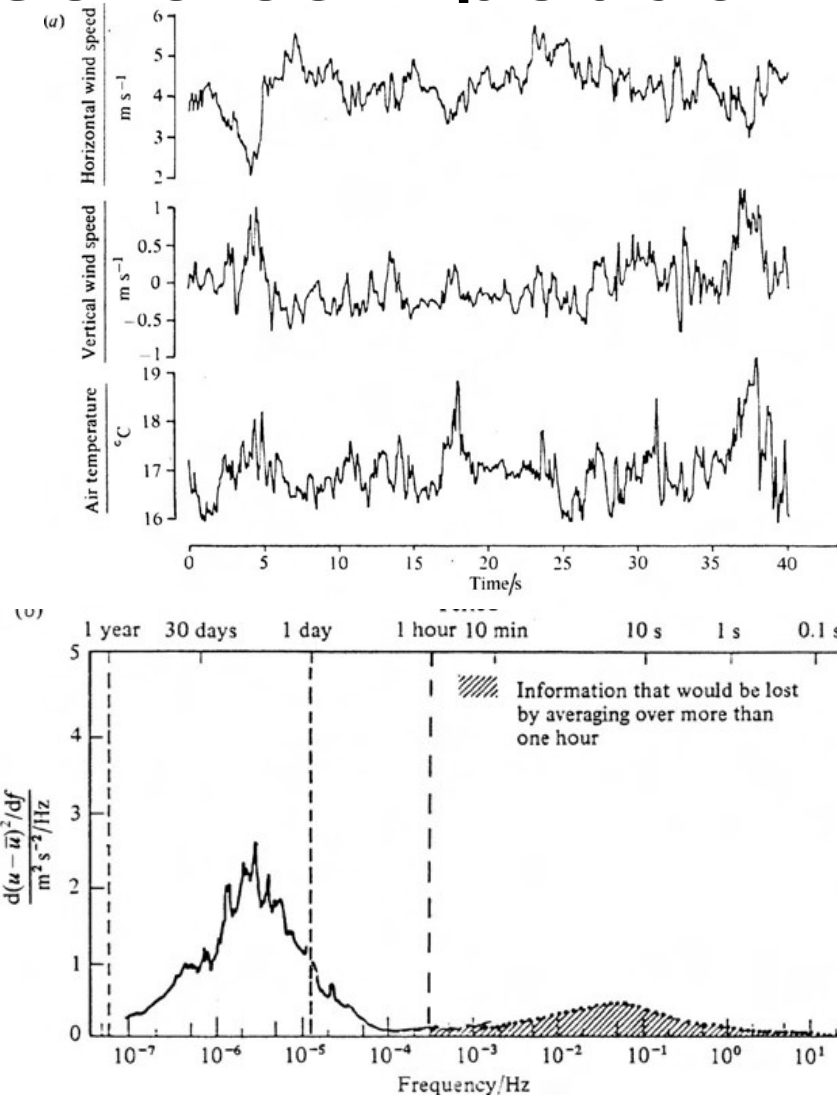
Varijacija vjetra u prostoru





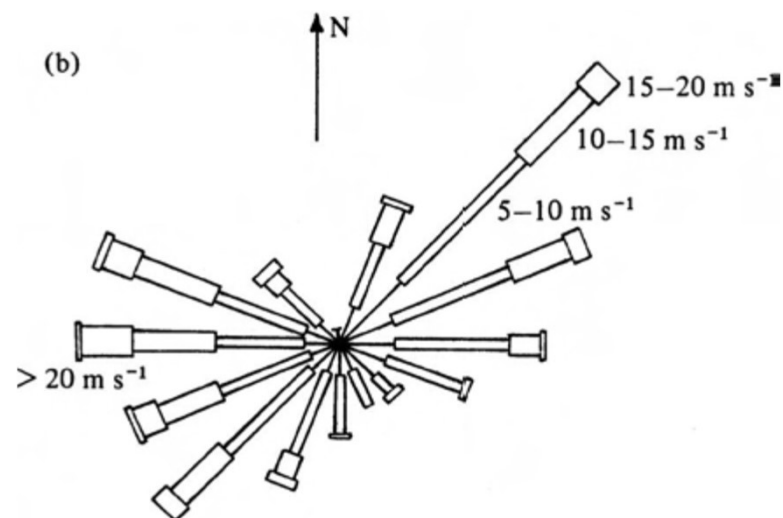
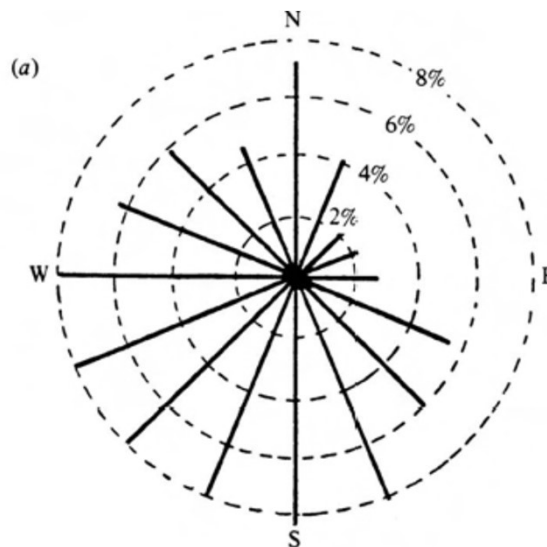
Osnovni meteorološki podaci

- Standardno mjerenje na visini od 10 m; bilježi se vjetar u trajanju od 10 min svakog sata ili rjeđe → slaba informacija o fluktuacijama u brzini i smjeru vjetra;
- Kontinuirano očitavanje anemometra – bolje
- Transformacija podataka u frekvencijsku domenu varijance brzine vjetra u odnosu na srednju vrijednost brzine vjetra,





- Meteorološki podaci o smjeru vjetra (strane svijeta) obično su dani kao “ruža vjetrova”
- Radijalne linije predstavljaju period u godini (postotak) tijekom kojeg puše vjetar iz određenog smjera
- Detaljnija ruža vjetrova s podacima o brzini vjetra





Brzina vjetra; Beaufortova skala; utjecaj na vjetroturbinu (VT)



Beaufortov broj	Brzina [m/s]	Brzina [km/h]	Brzina [čv]	Opis	Utjecaj na VT	Vidljivi efekti na kopnu	Vidljivi efekti na moru
0	0–0,4	0-1,6	0-0,9	Bonaca	-	Dim se uzdiže vertikalno	Ravno kao zrcalo – mirno kao ulje
1	0,4–1,8	1,6-6	0,9-3,5	Lagani	-	Vjetrokaz miruje; dim leluja	Valići
2	1,8-3,6	6-13	3,5-7	Lagani	-	Vjetrokaz miruje; lišće se pomiče	Vidljivi valovi
3	3,6-5,8	13-21	7-11	Lagani	Početak rada – mala električna snaga	Lišće se miče; zastava	Povremene krijeste na valovima
4	5,8-8,5	21-31	11-17	Umjereni		Pomicanje manjih grana; prašina	Vidljive krijeste
5	8,5-11	31-40	17-22	Svježi	Oko 1/3 pune snage turbine	Njihanje manjeg drveća	Svuda bijele krijeste
6	11-14	40-51	22-28	Jaki	Skoro puna snaga	Pomicanje većih grana	Veliki valovi, jake krijeste, pojava pjene



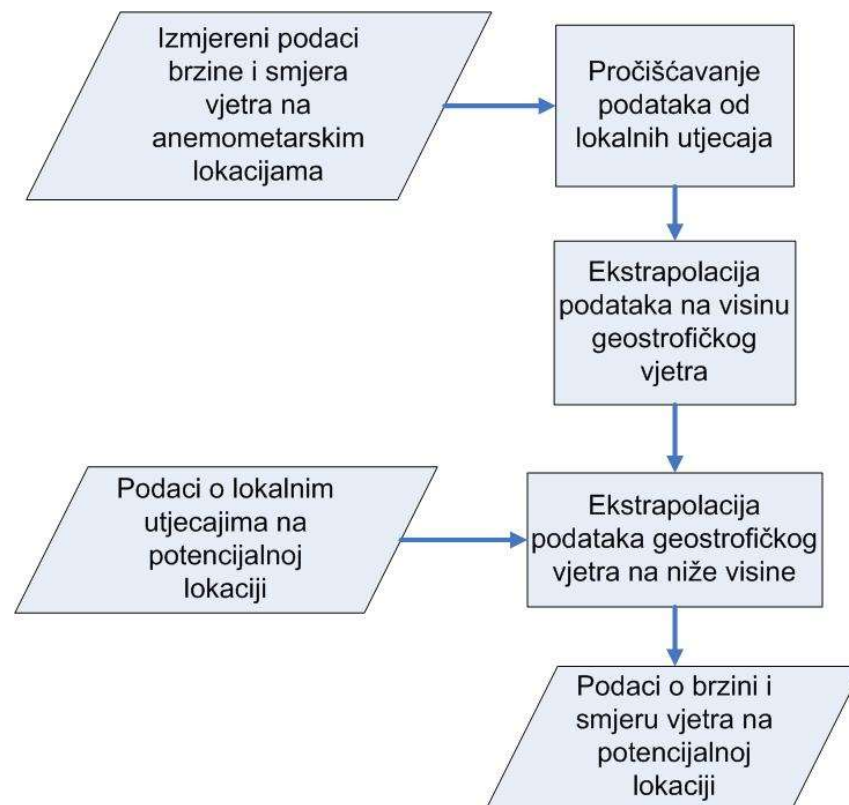
Beaufort ov broj	Brzina [m/s]	Brzina [km/h]	Brzina [čv]	Opis	Utjecaj na VT	Vidljivi efekti na kopnu	Vidljivi efekti na moru
7	14-17	51-63	28-34	Jaki	Puna snaga	Drveće se miče	Pjena se otkida od krijesta
8	17-21	63-76	34-41	Olujni	Isključenje turbine (zaustavljanje)	Teškoće u hodanju; pucanje grana	Gusto otkidanje pjene
9	21-25	76-88	41-48	Olujni		Manja šteta – dimnjaci	Intenzivna perjanica pjene
10	25-29	88-103	48-56	Jaki olujni	Kriterij dizajna	Velika šteta, rušenje drveća	Veliki valovi s dugačkim otkidajućim krijestama
11	29-34	103- 121	56-65	Jaki olujni	Oštećenja	Sveprisut na šteta	
12	>34	>121	>65	Orkanski	Oštećenja	Katastrofa	Zrak pun pjene, valovi skrivaju brodove

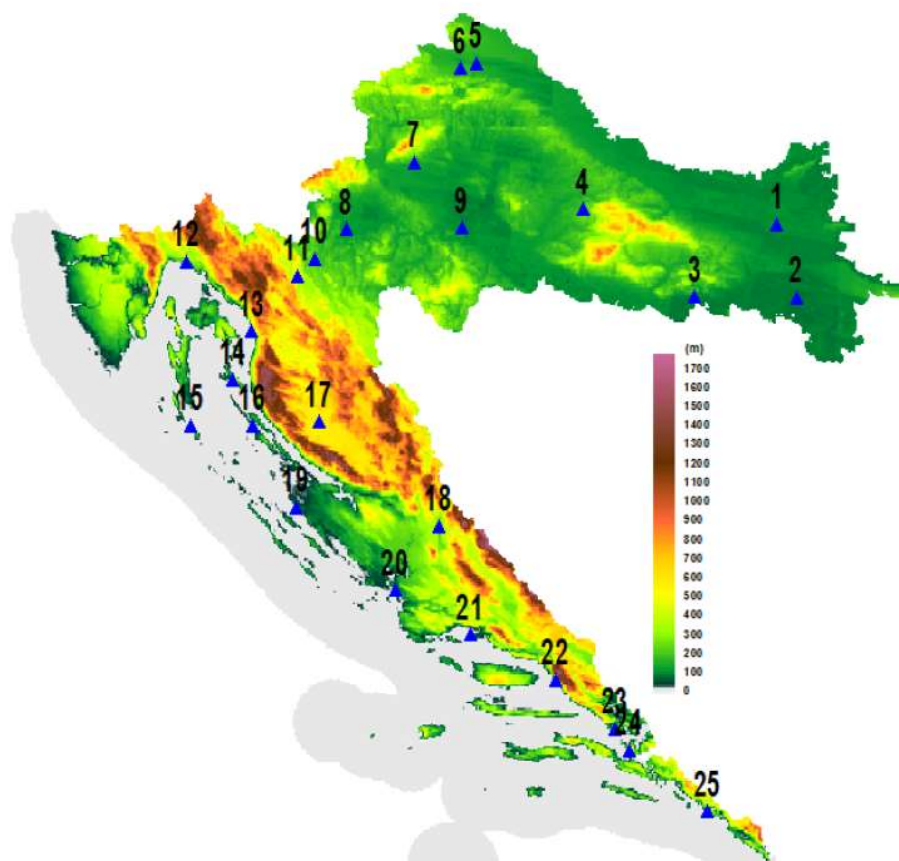


Analiza prirodnog potencijala za potrebe izgradnje vjetroelektrane



- Od interesa za vjetroelektrane je prizemni granični sloj atmosfere (do cca. 100 m),
- Izmjereni podaci su rezultat djelovanja sinoptičkih sustava i lokalne topografije,
- Na mjestima od interesa u pravilu nema anemografskih mjernih postaja (u Hrvatskoj ih prema podacima iz 2011. ima 60 – veliki broj na aerodromima) – atlas vjetra RH temeljem 25 lokacija
- Za procjenu potencijala na lokaciji od interesa koriste se numerički modeli, primjerice WAsP (Wind Atlas Analysis and Application Programme, Riso National Laboratory, Nizozemska):





Br.	Postaja	φ	λ	h_{NM} (m)	z_a (m)	razdoblje	NP (%)	NP5 (%)
1	Osijek Čepin	45° 31' 4"	18° 34' 11"	89	10	2003-09	4.0	2.5
2	Gradište	45° 09' 33"	18° 42' 13"	97	10	2003-09	4.1	3.4
3	Sl. Brod	45° 09' 44"	17° 59' 44"	88	10	2001-09	2.0	1.8
4	Daruvar	45° 35' 29"	17° 12' 37"	161	12	2000-09	0.1	0.1
5	Čakovec	46° 18' 28"	16° 28' 15"	170	14	2002-09	2.5	3.6
6	Varaždin	46° 16' 55"	16° 21' 17"	167	10	2002-09	4.6	6.7
7	Zagreb-Mak.	45° 49' 20"	16° 02' 01"	123	10	2000-09	1.5	1.2
8	Karlovac	45° 29' 37"	15° 33' 54"	110	10	2003-09	1.7	0.8
9	Sisak	45° 30' 00"	16° 22' 00"	98	15	2004-09	1.1	0.6
10	Gorinci	45° 21' 3"	15° 20' 33"	185	10	2005-09	2.3	2.3
11	Ogulin	45° 15' 47"	15° 13' 21"	328	10	2004-09	5.8	5.0
12	Rijeka	45° 20' 13"	14° 26' 34"	120	10	2000-09	5.5	5.8
13	Senj	44° 59' 37"	14° 54' 11"	26	10	1995-09	2.5	1.8
14	Rab	44° 45' 23"	14° 46' 18"	24	12	2004-09	3.5	8.7
15	Mali Lošinj	44° 31' 57"	14° 28' 19"	53	10	2003-09	3.7	5.0
16	Novalja	44° 32' 6"	14° 54' 22"	20	12	1996-09	6.2	6.2
17	Gospić	44° 33' 2"	15° 22' 23"	564	10	2000-09	4.6	4.2
18	Knin	44° 02' 27"	16° 12' 25"	255	10	2004-09	2.2	2.3
19	Zadar	44° 07' 48"	15° 12' 21"	5	10	2000-09	2.3	2.0
20	Šibenik	43° 43' 41"	15° 54' 23"	77	10	2004-09	1.1	0.6
21	Split-Marjan	43° 30' 30"	16° 25' 33"	122	12	2004-09	2.9	3.4
22	Makarska	43° 17' 16"	17° 01' 11"	52	15	2004-09	4.8	5.4
23	Ploče	43° 02' 52"	17° 26' 25"	2	10	2005-09	0.7	0.7
24	Komarna	42° 56' 41"	17° 32' 13"	99	10	2005-09	6.5	6.5
25	Dubrovnik	42° 38' 41"	18° 05' 06"	52	10	2001-09	6.8	6.9



Varijacija vjetra s visinom



- Na visini $z = 0$ brzina vjetra je uvijek jednaka 0,
- Unutar visine lokalnih prepreka brzina i smjer vjetra podložni su jakim fluktuacijama,
- Brzina vjetra raste s visinom

Logaritamski zakon (drugi izraz pretpostavlja brzinu od 0 m/s na površini)

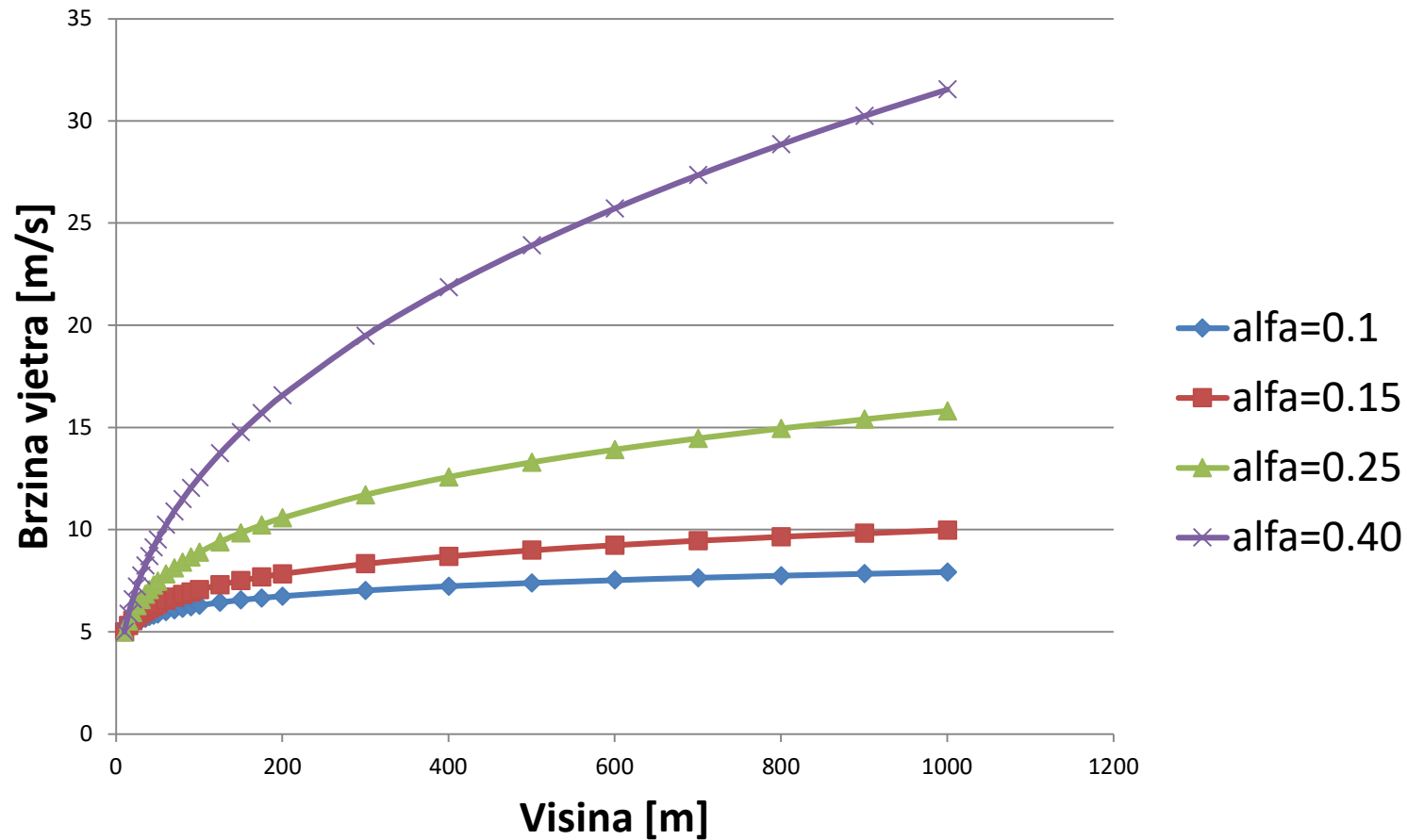
$$v_h = v_0 \frac{\ln\left(\frac{h}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_0}{z_0}\right)}; v_h = v_0 \frac{\ln\left(1 + \frac{h}{z_0}\right)}{\ln\left(1 + \frac{h_0}{z_0}\right)}$$

Zakon profila snage

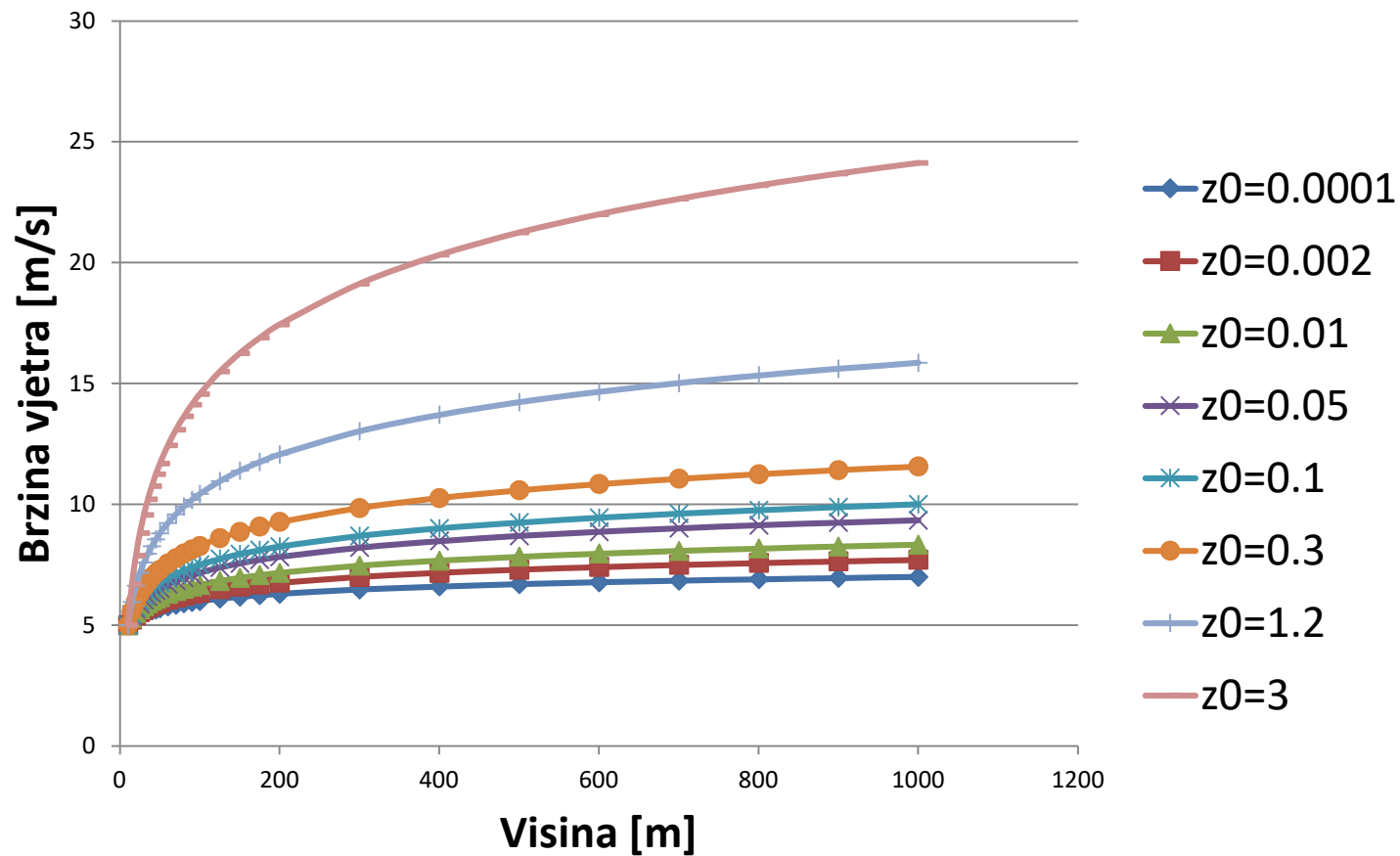
$$v_h = v_0 \left(\frac{h}{h_0} \right)^\alpha$$

v_h i v_0 brzine vjetra na visinama h i h_0 , α koeficijent smicanja vjetra, a z_0 koeficijent gruboće terena

Zakon profila snage uz $v_0=5$ m/s i $h_0=10$ m



☀️ Logaritamski zakon uz $v_0=5$ m/s i $h_0=10$ m 🌊





Parametri za određivanje vertikalnog profila snage



- Neke vrijednosti parametra α :
 - mirna voda i glatko i tvrdo tlo: $\alpha=0,10$
 - visoka trava $\alpha=0,15$
 - šumovito $\alpha=0,25$
 - grad sa velikim zgradama $\alpha=0,40$

Opis	Klasa grubosti	Z_0 [m]	Koeficijent smicanja α
Vodene površine	0	0,001	0,01
Otvoreno tlo s malo površinskih prepreka	1	0,12	0,12
Farme sa zgradama i živicom	2	0,05	0,16
Farme s puno drveća, šume, sela	3	0,3	0,28

Opis terena	Vrijednost z_0 [m]
Snijeg, ravna zemlja	0,0001
Mirno otvoreno more	0,0001
Valoviti more	0,001
Snijeg, kultivirana zemlja	0,002
Travnjaci	0,02-0,05
Žitna polja	0,05
Farme	0,002-0,3
Malo drveća	0,06
Puno drveća, nekoliko zgrada	0,3
Šume	0,4-1,2
Gradovi	1,2
Centri gradova s visokom zgradama	3



Distribucija brzine vjetra



- Od interesa je funkcija gustoće vjerojatnosti pojavljivanje određene brzine vjetra (u)
- “pravilo palca”:
 - Srednja brzina vjetra manja od 5 m/s → za očekivati je duga razdoblja bez vjetra – neprihvatljivo za vjetroelektrane;
 - Srednja brzina vjetra veća od 8 m/s → smatra se dobrom lokacijom
 - Srednja brzina vjetra veća od 12 m/s → smatra se odličnom lokacijom
- “hardcore” statistička analiza anemometarskih podataka → zahtijeva veliki broj mjerenja, dugotrajni numerički postupak, rezultat ovisan o mjerenjima koja ne moraju nužno prikazivati realno stanje;
- Analitički prikaz tražene gustoće vjerojatnosti (odličan kada postoje samo sumarni podaci o lokaciji ili treba projicirati podatke s jedne na drugu lokaciju)



- Jedan način definiranja funkcije gustoće stanja jest da je to vjerojatnost pojave vjetra brzine između v_a i v_b ; diskretne vrijednosti vode na histogram brzine vjetra

$$f(v_a \leq v \leq v_b) = \int_{v_a}^{v_b} f(v) dv$$

$$\int_0^{\infty} f(v) dv = 1$$



Weibullova funkcija



- Mjerene podatke moguće je jako dobro fitati dvoparametarskom funkcijom, primjerice Weibullovom funkcijom;

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

Odabir parametara k i c – cijeli niz empirijskih parametara

$$k = \left(\frac{\sigma_v}{\bar{v}}\right)^{-1,086} ; \quad \frac{c}{\bar{v}} = \left(0,568 + \frac{0,433}{k}\right)^{-\frac{1}{k}}$$

c približan srednjoj vrijednosti brzine, a k između 1,8 i 2,4;

Veći k znači da su brzine vjetra grupirane oko srednje brzine, odnosno ravnomjerniju raspodjelu – u području “trgovačkih vjetrova” k je oko 4-5



Rayleighova funkcija



- Za mnoge je lokacije prikladno dvoparametrsku funkciju zamijeniti jednostavnijom jednoparametarskom, Rayleighovom funkcijom

Weibullova funkcija

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

$k = 2$

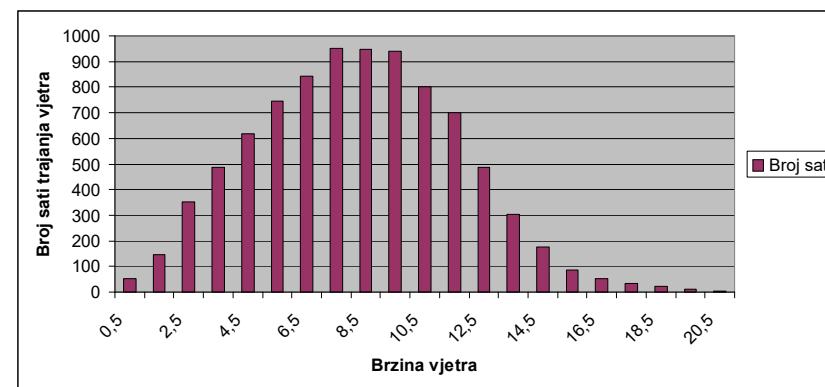
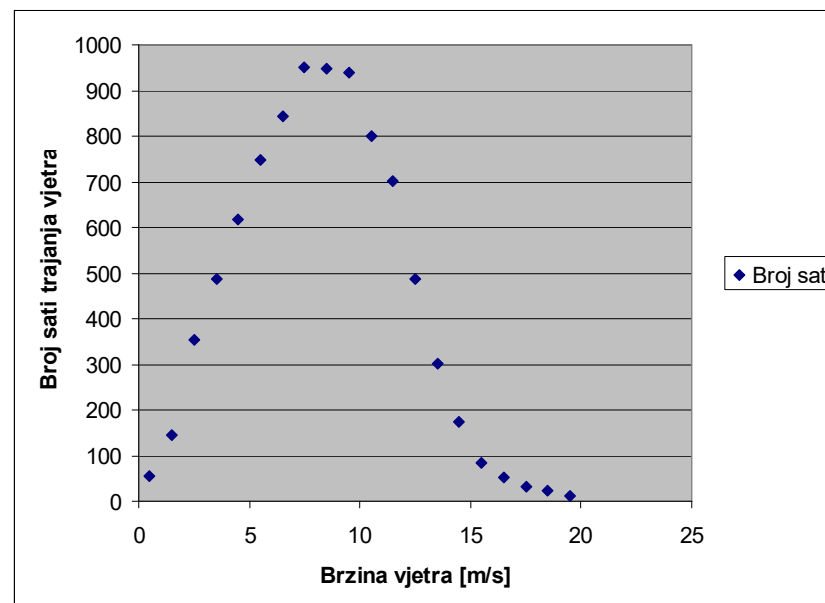


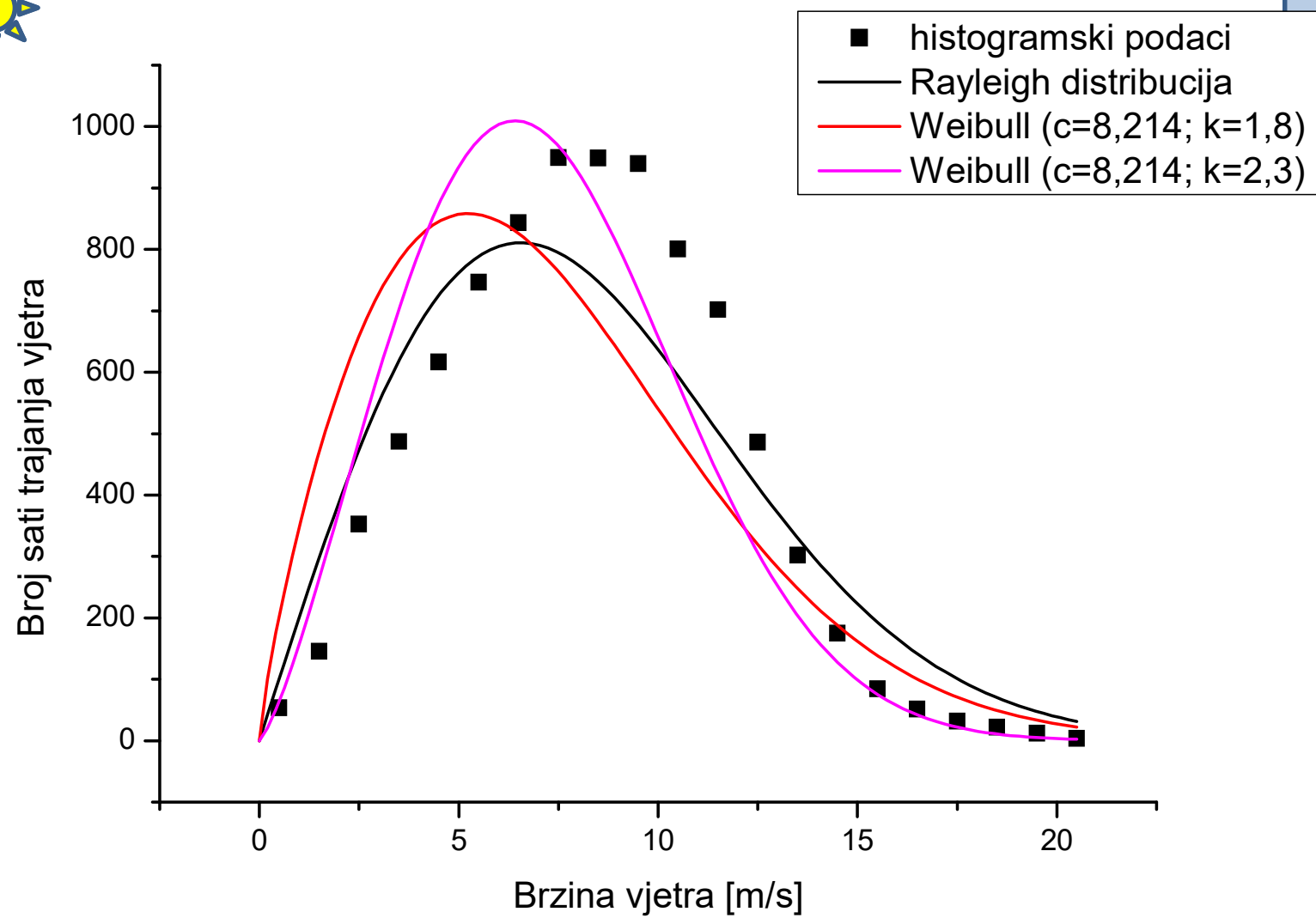
$$c = \frac{2\bar{v}}{\sqrt{\pi}}$$

Rayleighova funkcija

$$f(v) = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{v}{\bar{v}^2} \exp\left[-\frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{v}{\bar{v}}\right)^2\right]$$

Klasa	Sr.brz. vj.	Br. sati	Frek.	f*v
1	0,5	54	0,0062	0,003
2	1,5	146	0,0167	0,025
3	2,5	353	0,0403	0,101
4	3,5	487	0,0556	0,195
5	4,5	617	0,0704	0,317
6	5,5	747	0,0853	0,469
7	6,5	844	0,0963	0,626
8	7,5	950	0,1084	0,813
9	8,5	949	0,1083	0,921
10	9,5	940	0,1073	1,019
11	10,5	801	0,0914	0,960
12	11,5	702	0,0801	0,922
13	12,5	486	0,0555	0,693
14	13,5	302	0,0345	0,465
15	14,5	175	0,0200	0,290
16	15,5	85	0,0097	0,150
17	16,5	52	0,0059	0,098
18	17,5	32	0,0037	0,064
19	18,5	22	0,0025	0,046
20	19,5	12	0,0014	0,027
21	20,5	4	0,0005	0,009
	UKUPNO	8760	1	8,214







Weibulova i Rayleighova funkcija u diskretnom obliku



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

$$f(v) = \Delta v \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \frac{v}{\bar{v}^2} \exp\left[-\frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{v}{\bar{v}}\right)^2\right]$$

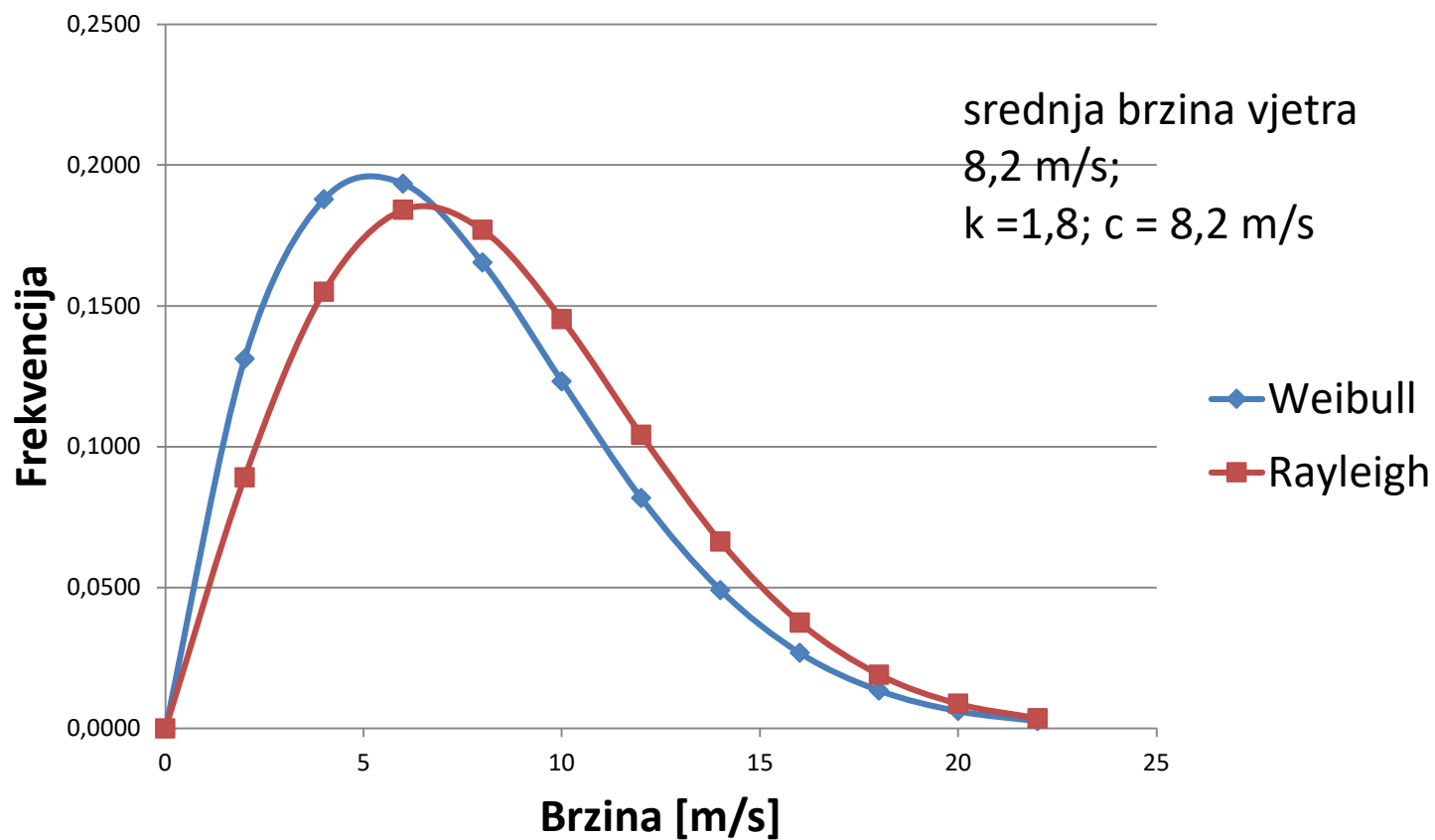
Δv - širina klase vjetra

v - srednja brzina pojedine klase vjetra

Primjer uz pretpostavku da je
srednja brzina vjetra 8,2 m/s;
 $k=1,8$; $c = 8,2$ m/s



Klasa	Srednja brzina klase [m/s]	Frekvencija - Weibull	Frekvencija - Rayleigh
1	0	0.0000	0.0000
2	2	0.1312	0.0892
3	4	0.1878	0.1550
4	6	0.1934	0.1841
5	8	0.1654	0.1770
6	10	0.1232	0.1453
7	12	0.0818	0.1043
8	14	0.0491	0.0663
9	16	0.0268	0.0376
10	18	0.0134	0.0191
11	20	0.0062	0.0087
12	22	0.0026	0.0036
		0.9810	0.9902

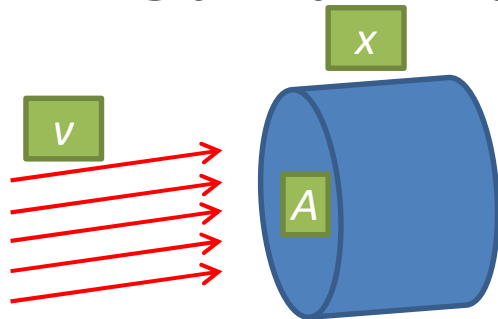




Energija i snaga vjetra



- Energija vjetra je kinetička energija mase zraka



Gustoća zraka ovisi o temperaturi, tlaku i vlažnosti

Možemo koristiti podatak da je gustoća zraka 1,225 kg/m³ koja vrijedi za standardne uvjete na moru (1,013 Mpa i 15°C)

$$E_k = \frac{mv^2}{2}$$

$$m = \rho V = \rho Ax = \rho Avt$$

$$E_k = \frac{1}{2} \rho A v^3 t \quad \} \quad P_{\text{vjetra}} = \frac{1}{2} \rho A v^3$$



Teorijski iskoristiva snaga vjetra

Ako pretpostavimo da je srednja brzina vjetra kroz površinu koju zahvaćaju lopatice jednaka prosječnoj brzini vjetra prije i poslije rotora, odnosno da vrijedi

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad \text{pri čemu } v_1 \text{ označava brzinu prije, a } v_2 \text{ brzinu poslije rotora}$$

onda je masa zraka koja u jediničnom vremenu prođe kroz rotor

$$\frac{m}{t} = \rho A \frac{v_1 + v_2}{2}$$

Kinetička energija koju je vjetar izgubio prilikom prolaska kroz rotor u jedinici vremena iznosi

$$\Delta E_k = \frac{1}{2} m (v_1^2 - v_2^2)$$

Kombiniranje prethodna dva izraza rezultira izrazom za snagu rotora

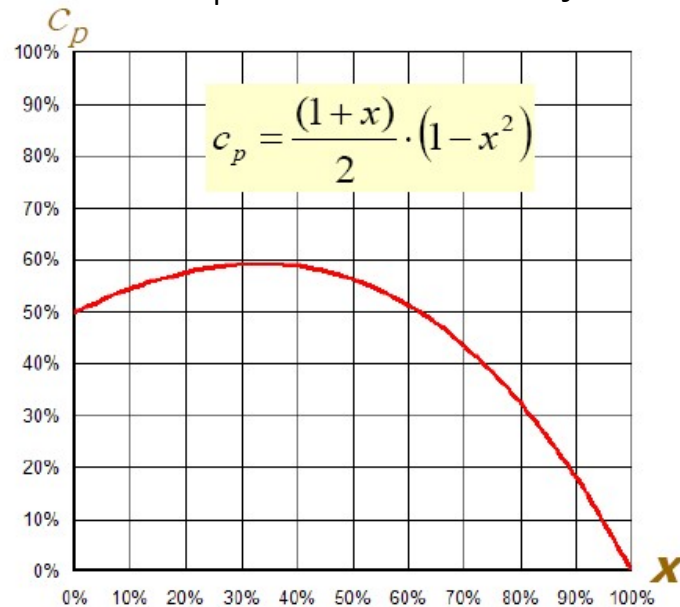
$$P = \frac{1}{4} \rho A (v_1 + v_2) (v_1^2 - v_2^2)$$



Uvođenjem supstitucije $x = \frac{v_2}{v_1}$ Izraz za snagu možemo pisati u obliku

$$P = \frac{1}{4} \rho A \frac{(v_1 + v_2)}{v_1} \frac{(v_1^2 - v_2^2)}{v_1^2} v_1^3 = \frac{1}{2} \rho A v_1^3 \frac{(1+x)}{2} (1-x^2) = \frac{1}{2} \rho A v_1^3 c_p$$

Pri čemu c_p nazivamo koeficijent snage vjetroagregata



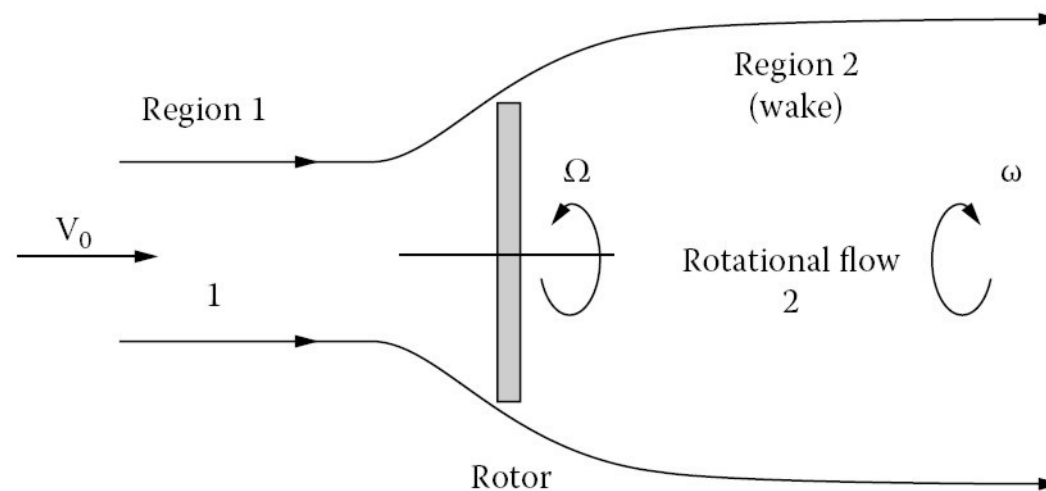
Maksimalna vrijednost od 59,3% postiže se kod $x=1/3$.



Stvarna iskoristivost snage vjetra

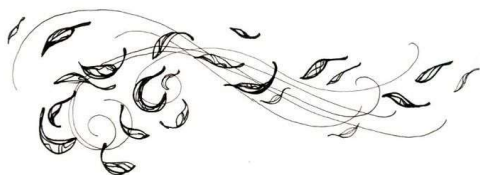
U praksi tri efekta utječu na smanjenje snage:

- Rotacija zračne mase iza rotora (očuvanje kutne količine gibanja),
- Konačan broj lopatica,
- Postojanje, aerodinamičkog trenja – složena aerodinamička teorija.





U konačnici



Snaga vjetra

Snaga rotora

Snaga na mreži



c_p (45%-52%)

η_g

Mjenjačka kutija, generator, konverter
(95%-97%) (97%-98%) (96%-99%)

Ukupna iskoristivost konverzije: oko 42-50%



Izvedbe vjetroagregata



- horizontalna os (HAWT) – svi komercijalni VA na mreži
- prednosti: bolja efikasnost; razvijena tehnologija
- nedostaci: stup



ZPF-FER-UNIZG



Tehnološke osnove iskorištavanja obnovljivih izvora energije 2020/21

- vertikalna os (VAWT); Savonius i Darrieus tipovi
- prednosti: mogućnost pozicioniranja generatora i opreme na zemlji; nije potreban mehanizam za zakretanje
- nedostaci: manje brzine vjetra blizu zemlje; manja efikasnost; Darrieus nije samostartajući (nije problem ako je spojen na mrežu); “potporne” žice; otežana promjena ležajeva; varijacija snage tijekom jednog okreta





Pozicioniranje HAWT-a



– Upwind

- rotor okrenut prema dolazećem vjetru
- lopatice rotora nisu zaklonjene iza stupa iako postoji blago zakrivljenje silnica vjetra prije rotora zbog stupa
- mora postojati mehanizam za zakretanje
- izvedba rotora (lopatica) zahtijeva čvrstoću

– Downwind

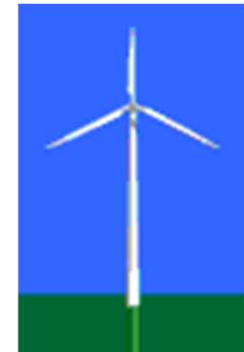
- Kućište okrenuto prema nadolazećem vjetru
- Ne mora postojati mehanizam za zakretanje
- izvedba rotora (lopatica) može biti fleksibilna
- Fluktuacija snage tijekom jednog okreta



Broj lopatica HAWT-a



- Zašto ne paran broj?
- Trokraki “danski” koncept
- Dvokraki koncept – paran
- Jednokraki koncept





Kako optimirati – što je cilj – efikasnost ili cijena po kWh?



- Broj lopatica u funkciji režima rada



Rad i pri malim brzinama vjetra; neefikasne na većim brzinama - isključenje



Ne rade na malim brzinama; bolje iskorištenje kod većih brzina vjetra

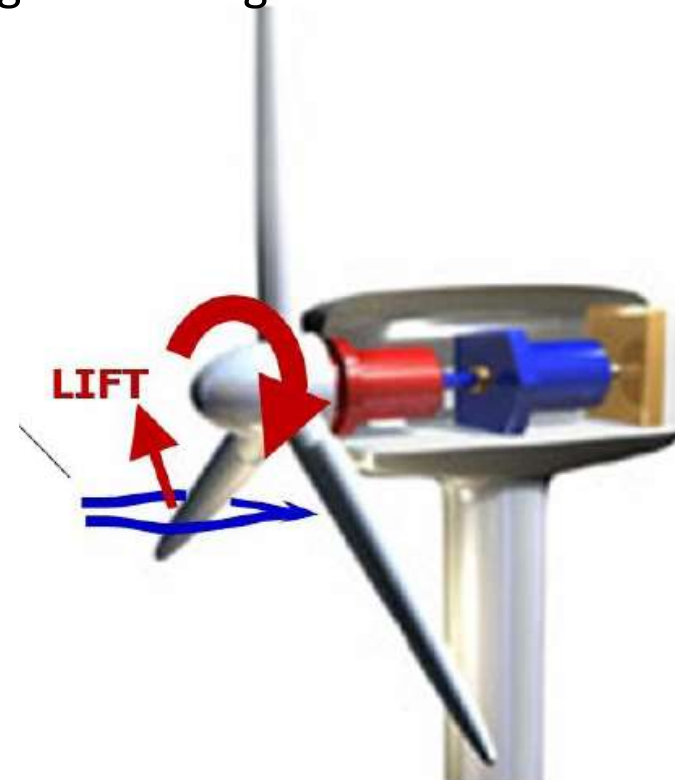
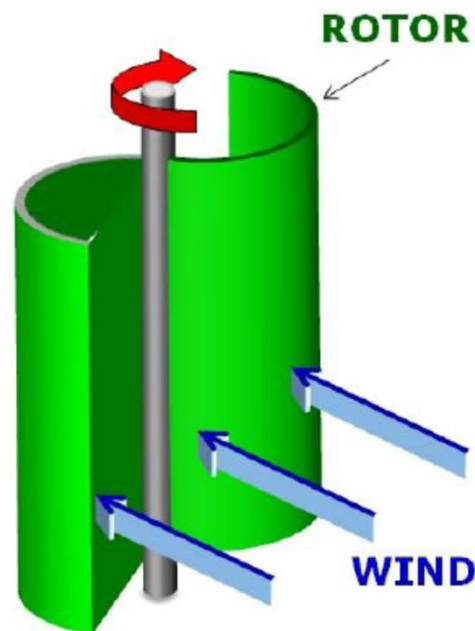
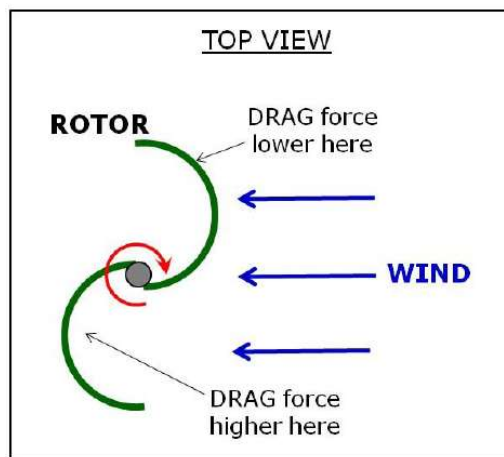
- Relativan odnos veličine generatora i rotora
- Visina tornja
- Buka – mehanička i aerodinamička – problem optimiranja?

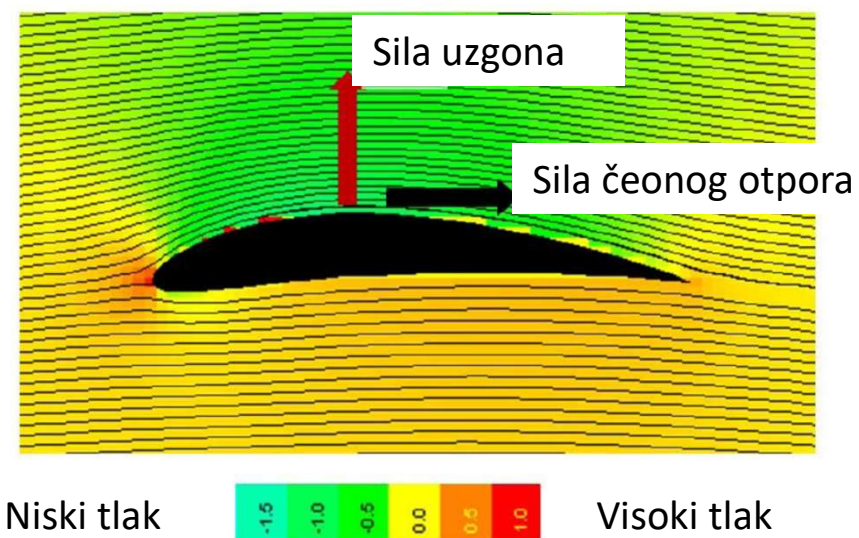
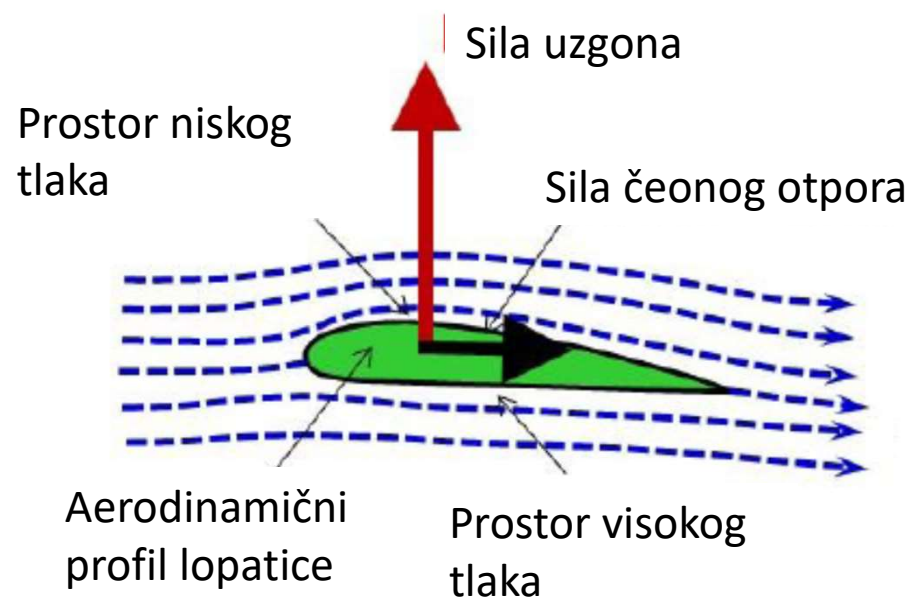


Zašto se rotor okreće



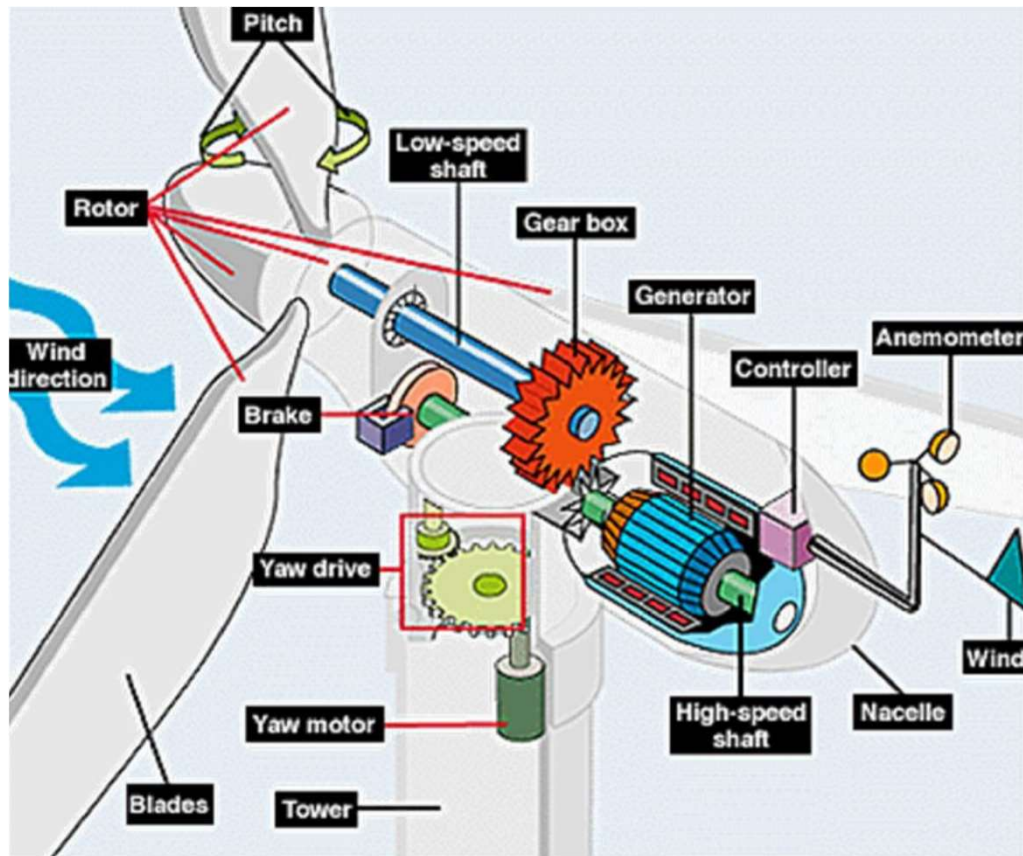
- Sila čeonog otpora ("Drag force")
- Sila na otvorenoj (konkavnoj) strani površine je veća od sile na zatvorenoj (konveksnoj) strani
- Sila uzgona ("Lift force")
- Zahtijeva aerodinamički profil lopatica, ali je iskoristivost veća nego kod "drag" sile







Glavne komponente HAWT-a



Pitch	Zakretanje lopatica
Rotor	Rotor
Wind direction	Smjer vjetra
Brake	Kočnica
Low-speed shaft	Sporookretna osovina
Gearbox	Prijenosnik (multiplikator)
Controller	Upravljanje
Anemometer	Anemometar
Wind vane	Pokazivač smjera vjetra
High-speed shaft	Brzookretna osovina
Yaw drive	Zakretanje
Yaw motor	Zakretni motor
Blades	Lopalice
Tower	Toranj
Nacelle	Kućište



Generator

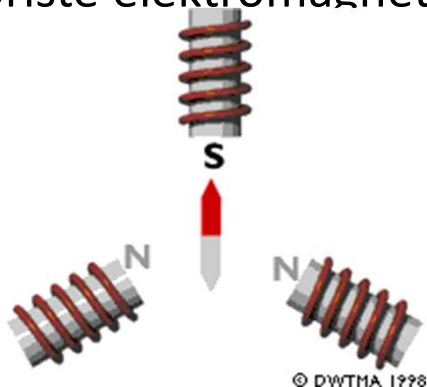


- Pretvorba mehaničke u električnu energiju
- Kod VA izražena fluktuacija mehaničke snage
- Kod velikih VA generatori proizvode 690 V trofazni napon – zatim na transformator 10-30 kV
- Zahtijevaju hlađenje, zračno ili vodeno
- Sinkroni ili asinkroni; direktni ili indirektni spoj na mrežu



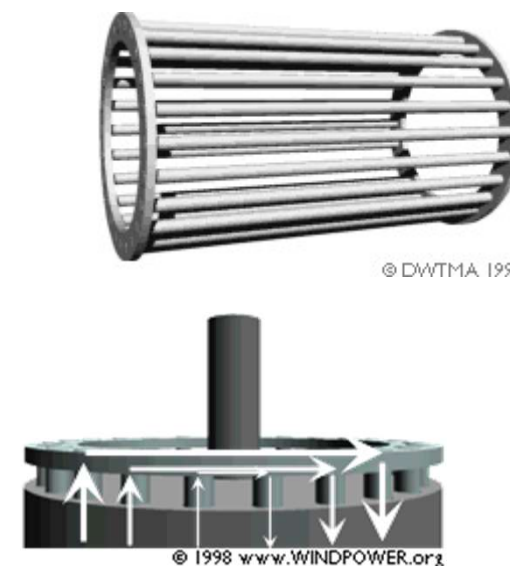
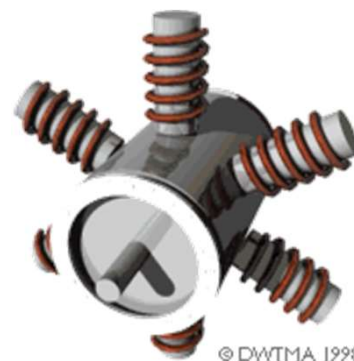
- Sinkroni

- Koriste rotirajuće magnetsko polje
- Na slici je dvopolni motor s permanentnim magnetom – princip rada generatora je suprotan – magnet rotira i inducira struju u zavojnicama
- Kod VA se umjesto permanentnih magneta koriste elektromagneti



- Asinkroni

- Uglavnom samo za VA
- Stator na mreži, rotor se okreće uz razliku od 1% brzine

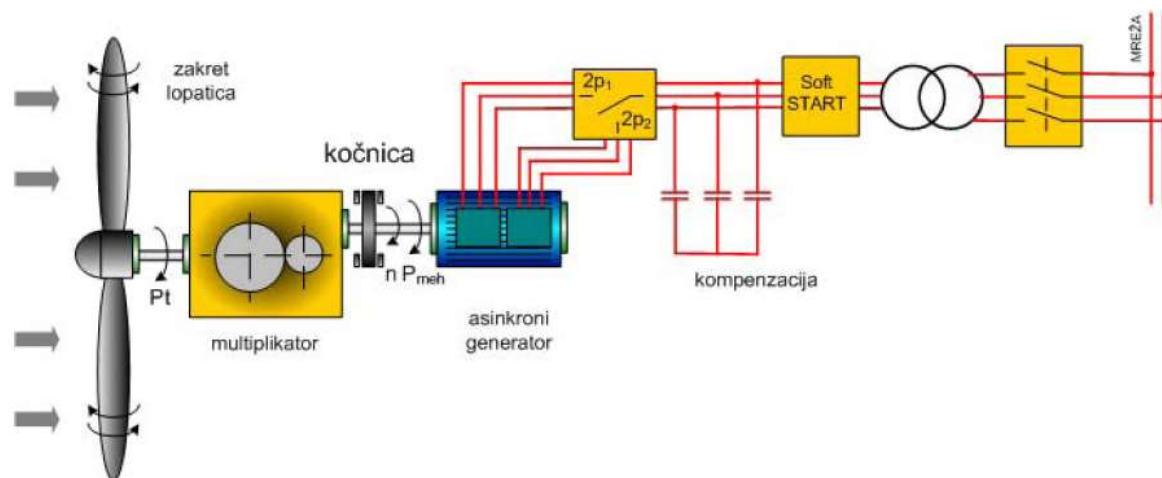




2.1. Asinkroni kavezni generator i turbine konstantne brzine vrtnje

Prednosti: jednostavnost izrade, jednostavno održavanje, prigušenje pulzacija momenta turbine, niska nabavna cijena i direktno spajanje na mrežu.

Nedostaci: potrebna jalova energija, potreban soft start uređaj za prvo priključenje na mrežu, primjenjivo samo za fiksne brzine turbine, upotreba multiplikatora, neupotrebljivo za mnogo polova.



Slika 1. Vjetroagregat s multiplikatorom, asinkronim generatorom i turbinom konstantne brzine vrtnje

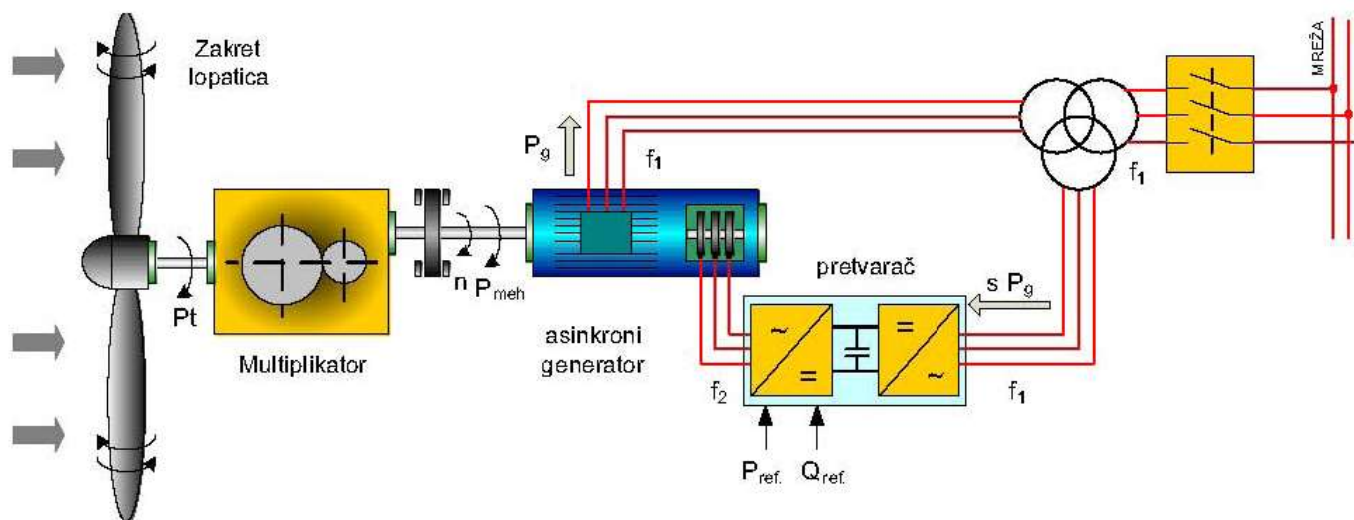
U praksi je česta varijanta kaveznog asinkronog generatora s promjenjivim brojem polova, obično za dvije brzine vrtnje.



2.2. Asinkroni klizno-kolutni dvostrano napajani generator

Prednosti: bitno smanjena snaga i cijena pretvarača, mogućnost regulacije brzine vrtnje za optimalno korištenje energije, jalova snaga za magnetiziranje stroja iz pretvarača, moguć podsinkroni i nadsinkroni rad.

Nedostaci: klizni koluti i četkice, trošenje, održavanje – složeno upravljanje agregatom, izravan spoj na mrežu otežan.



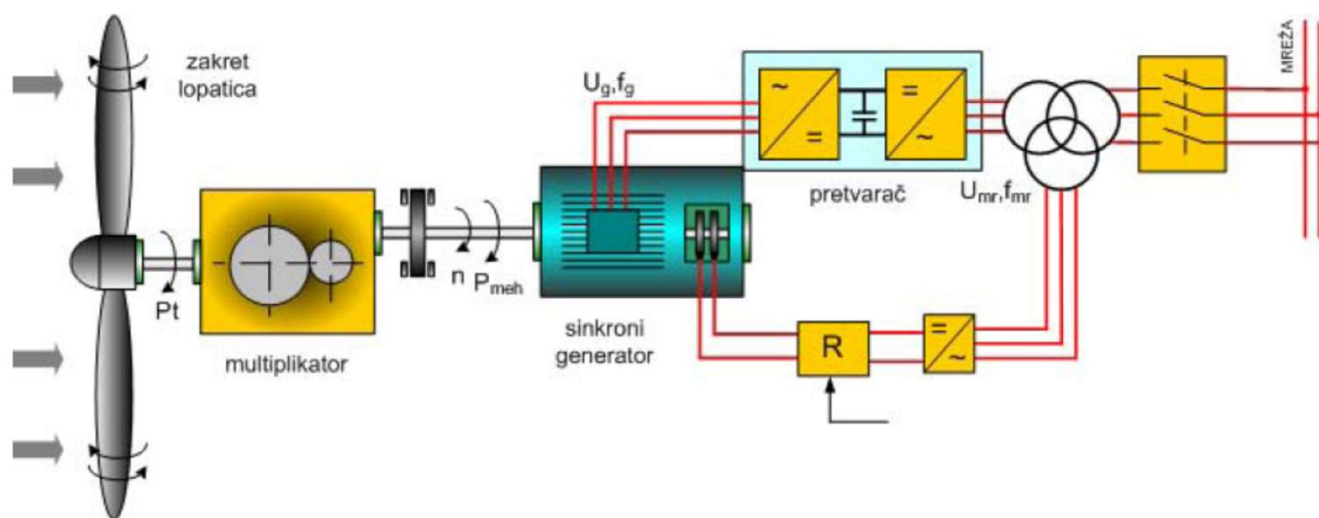
Slika 2. Vjetroagregat s multiplikatorom, asinkronim generatorom i turbinom promjenjive brzine vrtnje



2.3. Sinkroni generator s uzбудnom strujom na rotoru, s multiplikatorom

Prednosti: jednostavno upravljanje jalovom snagom, široko područje brzina vrtnje, jednostavan za upravljanje, male dimenzije i masa generator, standardni generator.

Nedostaci: potreban pretvarač za ukupnu snagu, potreban uzбудni sustav, klizni koluti i četkice, trošenje i održavanje, visoka cijena, gubici, problem održavanja multiplikatora.



Slika 3. Vjetroagregat s multiplikatorom, sinkronim generatorom i turbinom promjenjive brzine vrtnje

Priključenje generator ovog tipa u energetske sustav fiksne frekvencije izvodi se upotrebom frekvencijskog pretvarača.

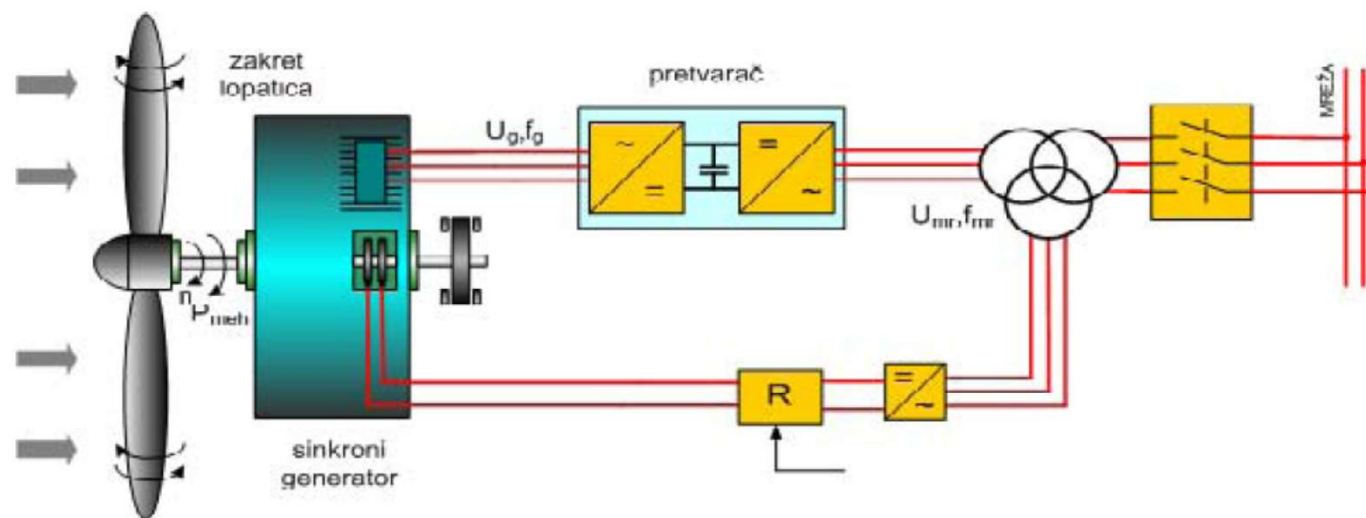


2.4. Sinkroni generator s uzбудnom strujom na rotoru, direktan pogon

(indirektno spajanje
na mrežu)

Prednosti: jednostavno upravljanje jalovom snagom, široko područje brzina vrtnje, jednostavan za upravljanje, jednostavnija izvedba vjetroagregata jer nema multiplikatora koji se smatra kompliciranim za izradu i održavanje, veća korisnost agregata

Nedostaci: potreban pretvarač za ukupnu snagu, potreban uzбудni sustav, klizni koluti i četkice, trošenje i održavanje, velike dimenzije i masa, problem izrade, transporta i montaže.

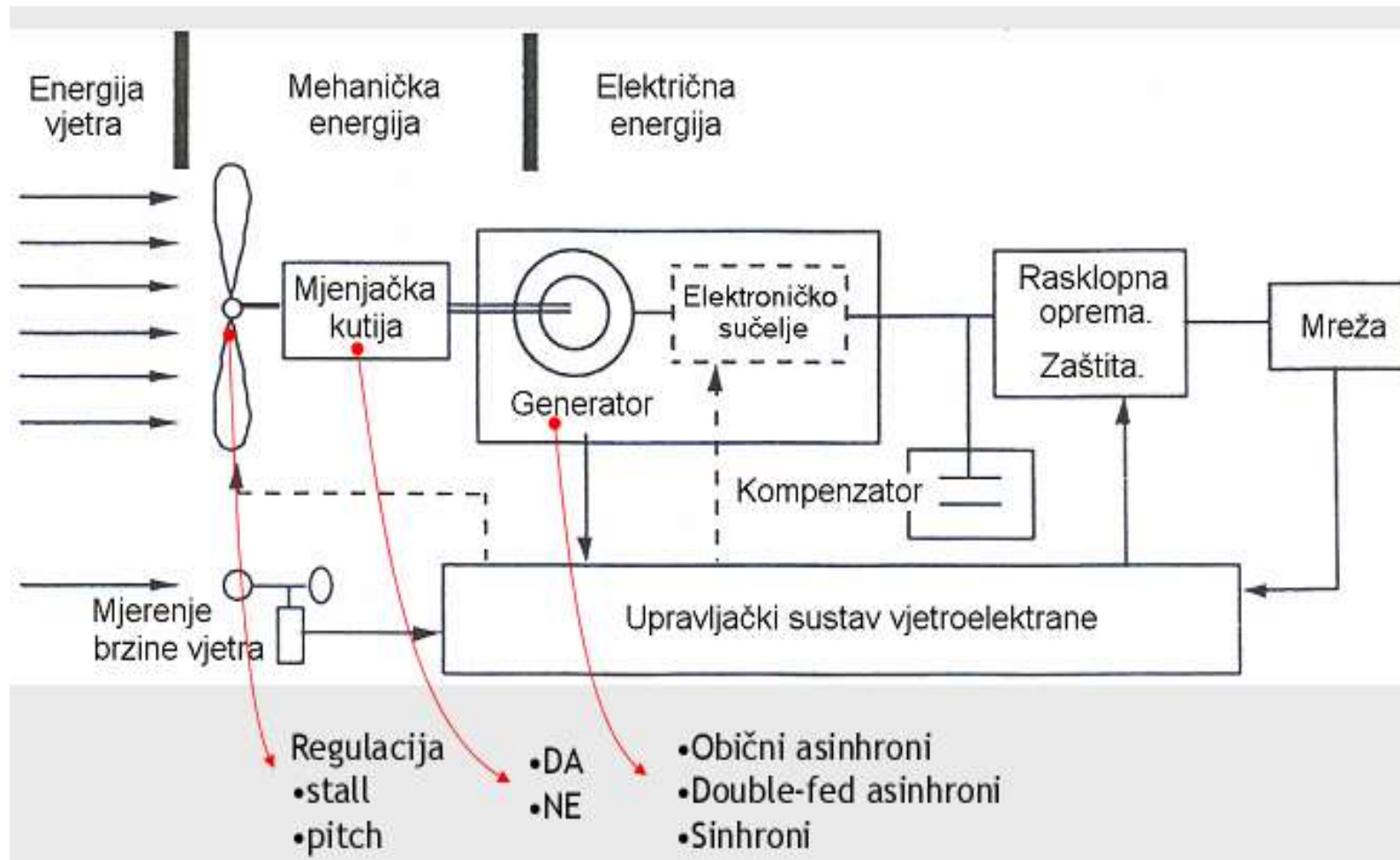


Slika 4. Vjetroagregat bez multiplikatora, sa sinkronim generatorom i turbinom promjenjive brzine vrtnje

Ovo je primjer ne klasične izvedbe generatora, velikih dimenzija i mase. Zbog velikog broja polova i male brzine vrtnje generator mora razvijati veliki moment vrtnje.



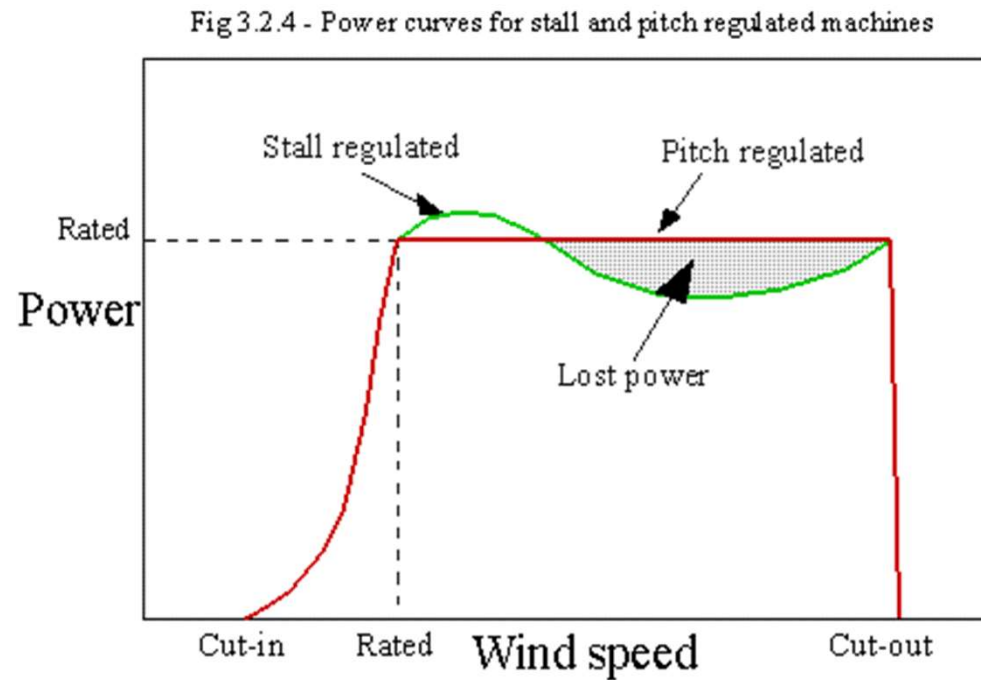
Upravljanje vjetroagregatom













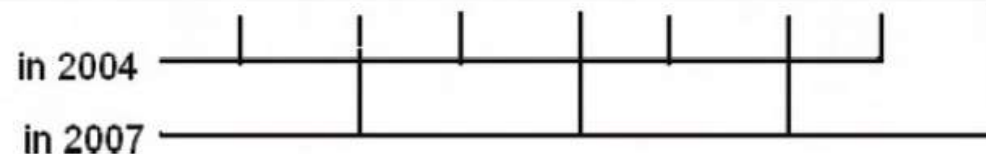
© 1998 www.WINDPOWER.dk

pasivna samoregulacija (*stall*)
aktivna regulacija (*pitch*)





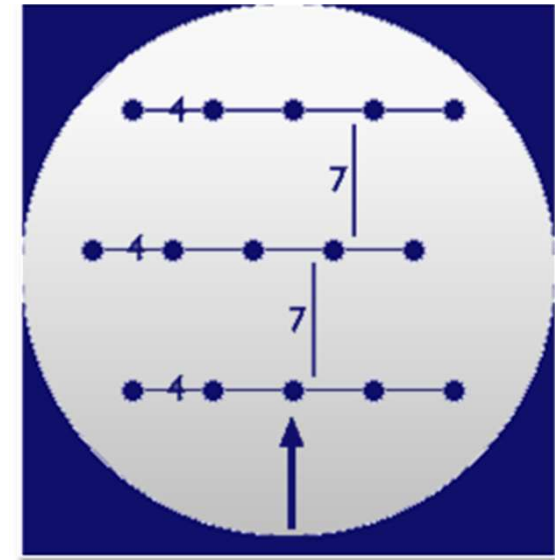
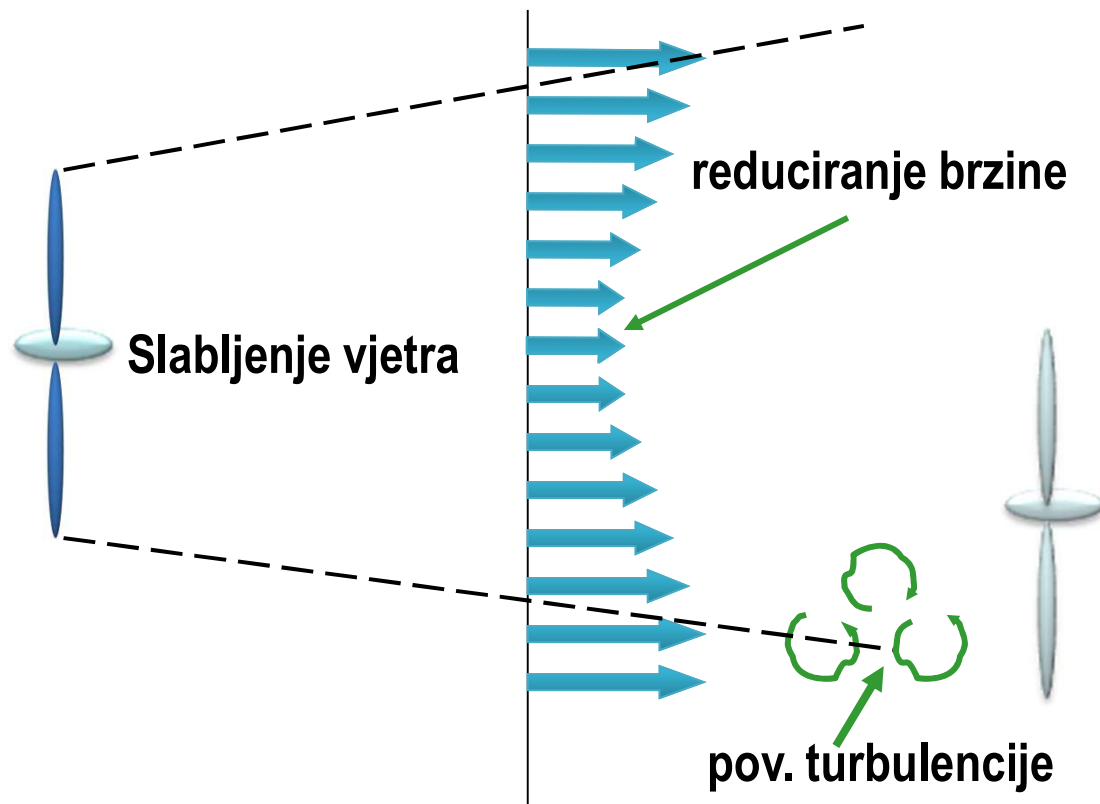
rotor diameter	25 - 45 m		45,1 - 64 m		64,1 - 80 m		> 80 m	
 no gearbox	57	6	29	82	414	262	3	110
 gearbox	0	0	88	31	407	92	203	300
 pitch	57	6	95	113	817	353	134	390
 stall	0	0	14	0	0	0	0	0
 active-stall	0	0	8	0	4	1	72	20
 1 fixed speed	0	0	0	0	0	4	0	0
 2 fixed speeds	0	0	27	0	4	1	72	20
 variable speed	57	6	90	113	817	349	134	390
number of WTs	57	6	117	113	821	354	206	410



Karakteristike VA instaliranih u Njemačkoj za 2004. i 2007.

Izvor: M. Stiebler, "Wind Energy Systems for Electric Power Generation", Springer 2008.

☀Efekt više VA u blizini



turbine niz vjetar:

- manje brzine: manje snage
- veće turbulencije: više opterećenja
- veći broj VA u VE povećava gubitke

- optimiranje pozicioniranja za snagu i trošenje (računalni programi za simulacije i mjerenje)
- razmak u dominantnom smjeru od 4 do 9 promjera
 - gubici od 5 do > 60%, za manji (2x2) ili veći (10x10) broj VA u VE



Tip Speed Ratio



Uvodimo parametar λ (tip speed ratio - TSR)

$$\lambda = \frac{\Omega R}{v}$$

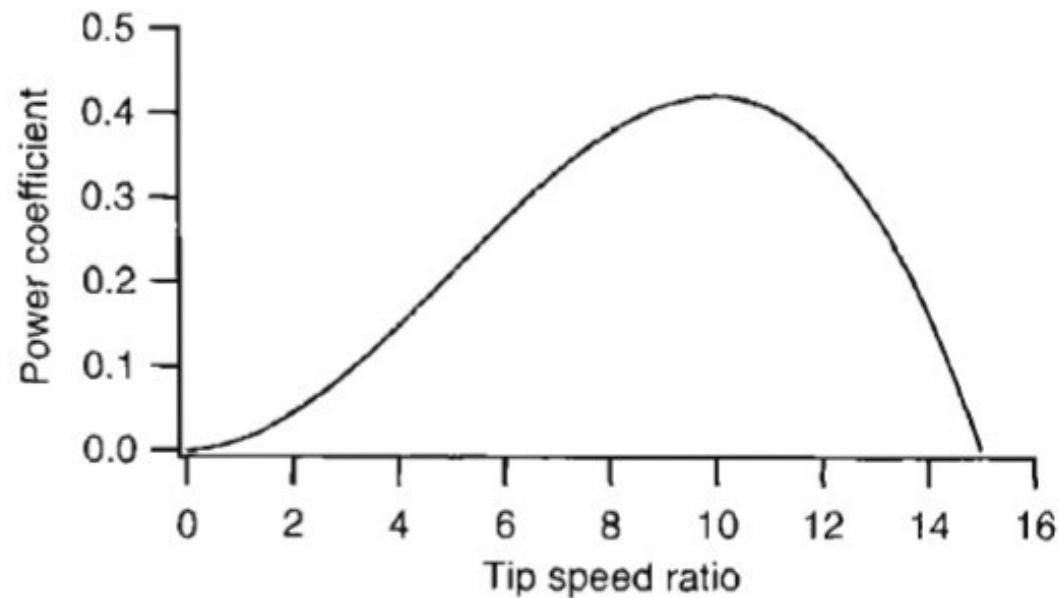
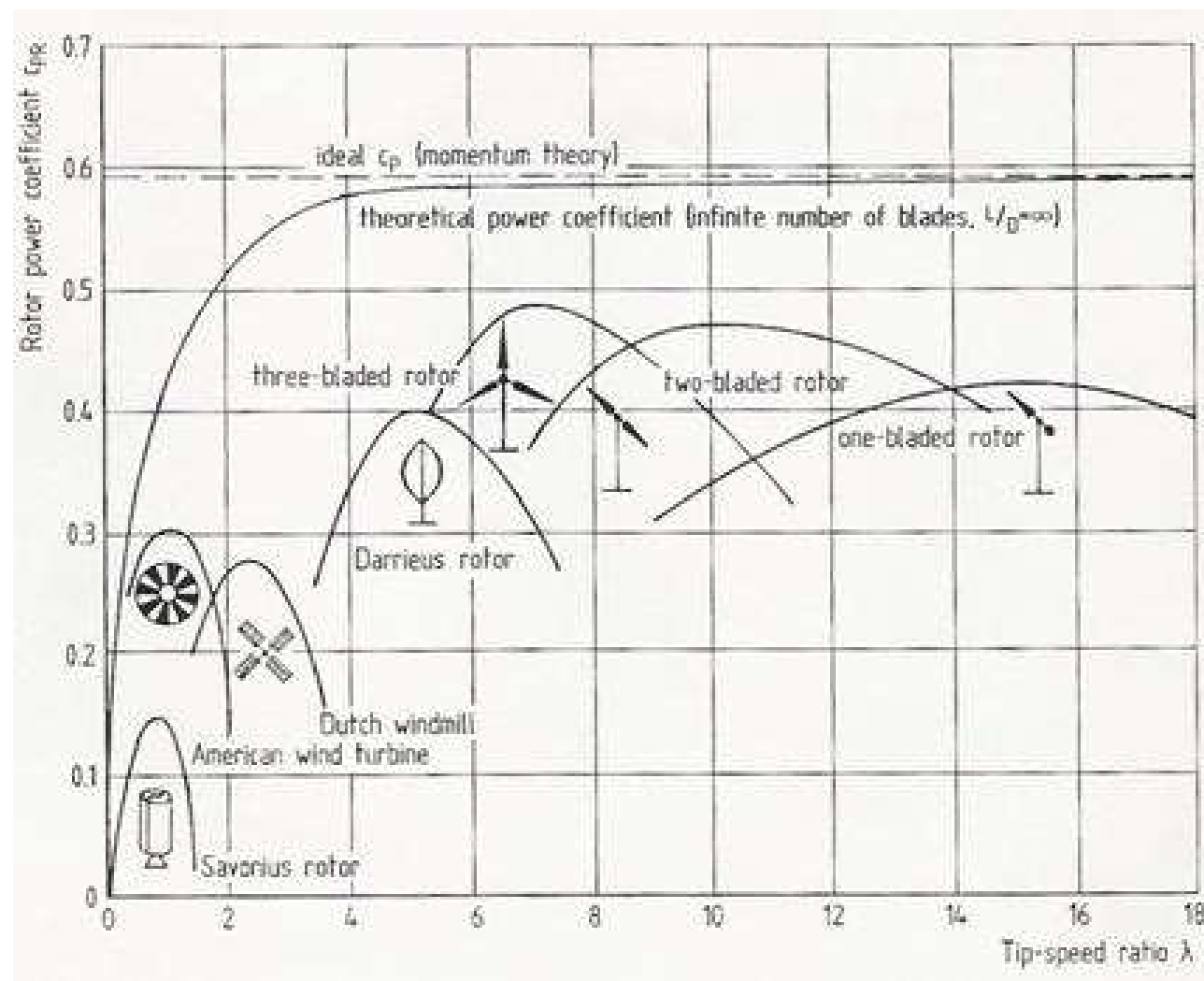


Figure 3.28 Sample $C_p \sim \lambda$ curve for a high tip speed ratio wind turbine





Optimalni TSR



- Rotor se sporo okreće – vjetar slobodno prolazi kroz lopatice – mala ekstrakcija snage
- Rotor se brzo okreće – “čvrsta” prepreka za vjetar – mala ekstrakcija snage
- Potrebno je optimirati brzinu okretanja rotora – odnosno TSR – ovisno o dizajnu vjetroagregata i lopatica, kao i o broju lopatica
- Za vjetroagregate spojene na mrežu s tri lopatice – optimalni TSR je oko 7 (6-8)
- U principu poželjan je veliki faktor snage (veća brzina okretanja osovine što je poželjno za generator) – ima i nedostataka
- Nedostaci velikog TSR:
 - Obodna brzina lopatica veća od 80 m/s – oštećenja zbog erozije – visokokvalitetni materijali
 - Veća buka
 - Vibracije, posebno za rotore s jednom ili dvije lopatice
 - Poteškoće na osovine kod pokretanja
 - Smanjenje efikasnosti rotora
 - Mogućnost pobjega turbine