

Energija vjetra

Korištenje energije vjetra za proizvodnju el. energije
Energijske tehnologije
FER 2008.



Gdje smo:

1. Organizacija i sadržaj predmeta
2. Uvodna razmatranja
3. O energiji
4. Energetske pretvorbe i procesi u termoelektranama
5. Energetske pretvorbe i procesi u hidroelektranama
6. Energetske pretvorbe i procesi u nuklearnim el.
7. Geotermalna energija
8. Potrošnja električne energije
9. Prijenos i distribucija električne energije
10. Energija Sunca

11. Energija vjetra

12. Biomasa
13. Gorivne ćelije i ostale neposredne pretvorbe
14. Skladištenje energije
15. Utjecaj na okoliš, održivi razvoj i energija

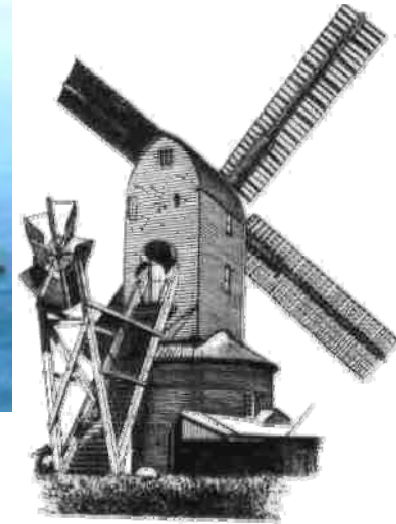
Sadržaj

- Uvod
- Snaga i energija vjetra
- Električna snaga vjetroatregata
- Proizvedena električna energija u vjetroelettrani
- Posebnosti proizvodnje električne energije u vjetroelettrani

Uvod:

Povijest korištenja energije vjetra

- jedrenje u Egiptu - prije 4500 g.
- pumpanje vode u Indiji i mljevenje žitarica u Kini - prije 2400 g.
- Perzija, Afganistan, Europa i drugi sve do industrijske revolucije za pumpanje vode i mljevenje žitarica
- krajem 19. st. prve el. VE u Danskoj i SAD
- 1941. u SAD vjetroelektrana za proizvodnju el. en. snage 1,25 MW
- 1980-te u SAD
- zadnjih 15 godina u Europi i šire



Mlin na vjetar – Afghanistan (900. god.)



Vjetrenjače – Europa (srednji vijek)



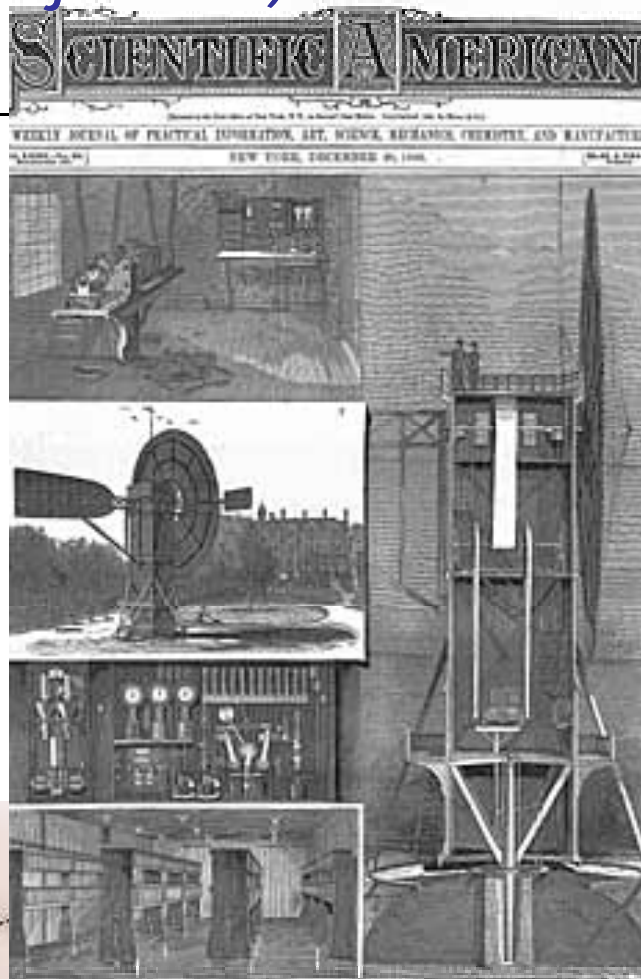
Windmills kod Campo de Criptana,
La Mancha (Španjolska)



Prvi vjetroatregati - Europa i SAD (kraj 19. st.)

Novi početak – California 1985.

SAD -
Charles
Bush 1890



Danas – energija vjetra dio rješenja



41x1 MW Mitsubishi MWT-1000A, 55 m stup,
29.5 m lopatice, Combine Hills projekt u NE Oregon



10 x 2,3 MW Bonus (Siemens) VA
visina stupa 61 m, dubina vode 15 m

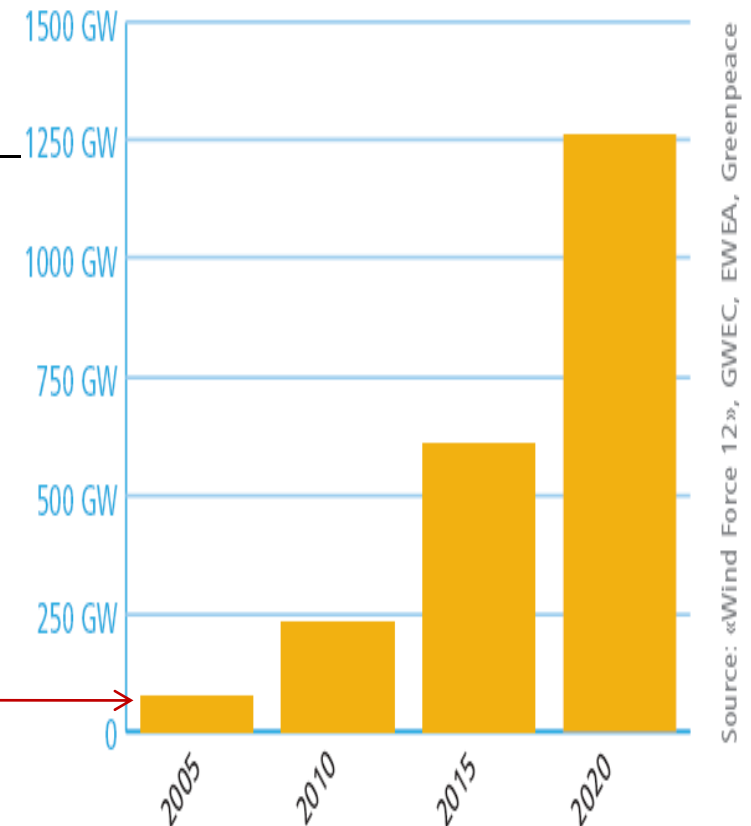
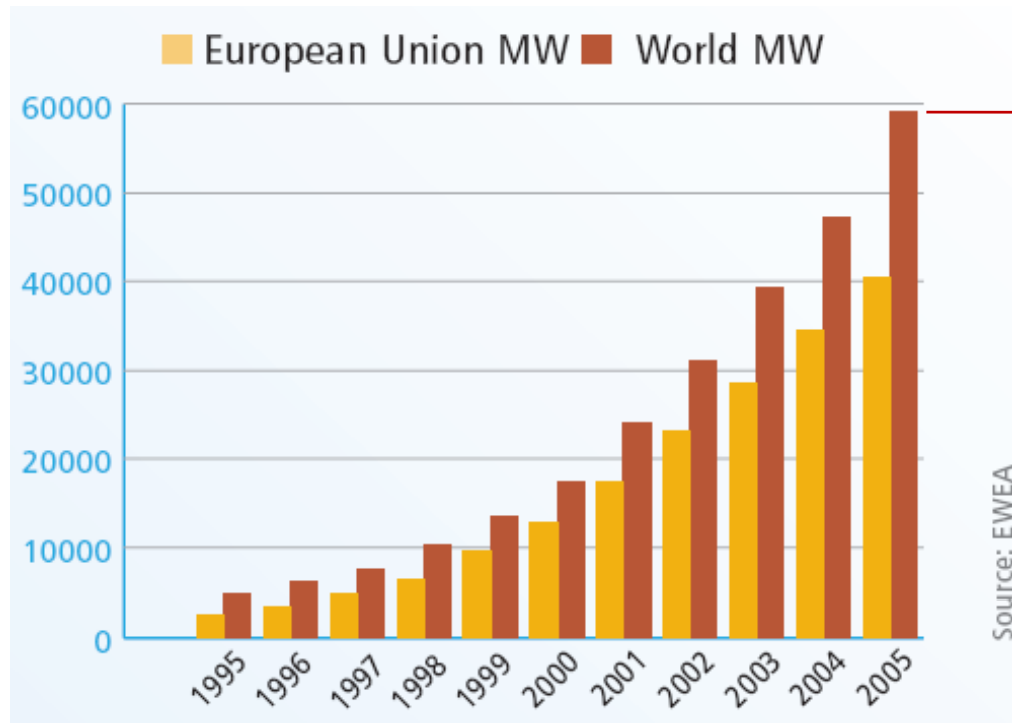


<http://www.samsohavvind.dk/windfarm/>

Stanje i perspektive

Podatci za 2005 .

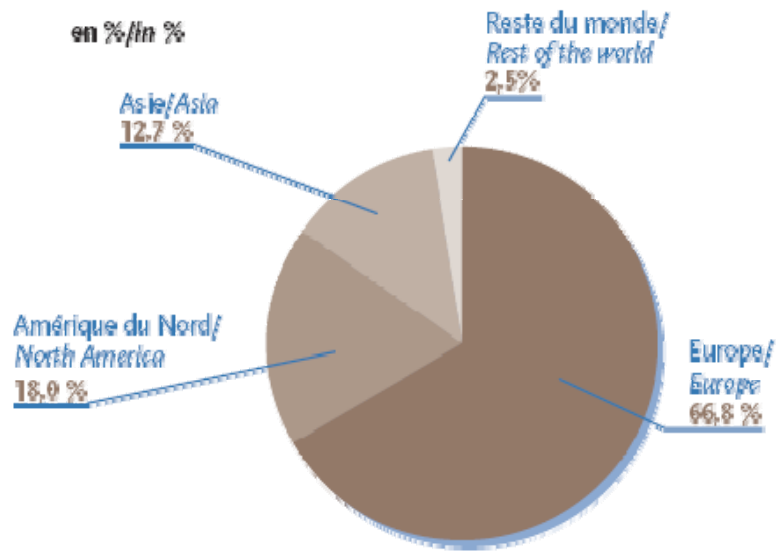
- ~60,000 MW -> ~100 TWh/yr
- 70% Europa; 17% SAD
- \$12 milijardi godišnjeg prometa:
50% izvedba projekata; 45% prodaja el. en.;
5% održavanje i pogon
- **mali vjetroagregati:** \$20-50 milijuna/god.



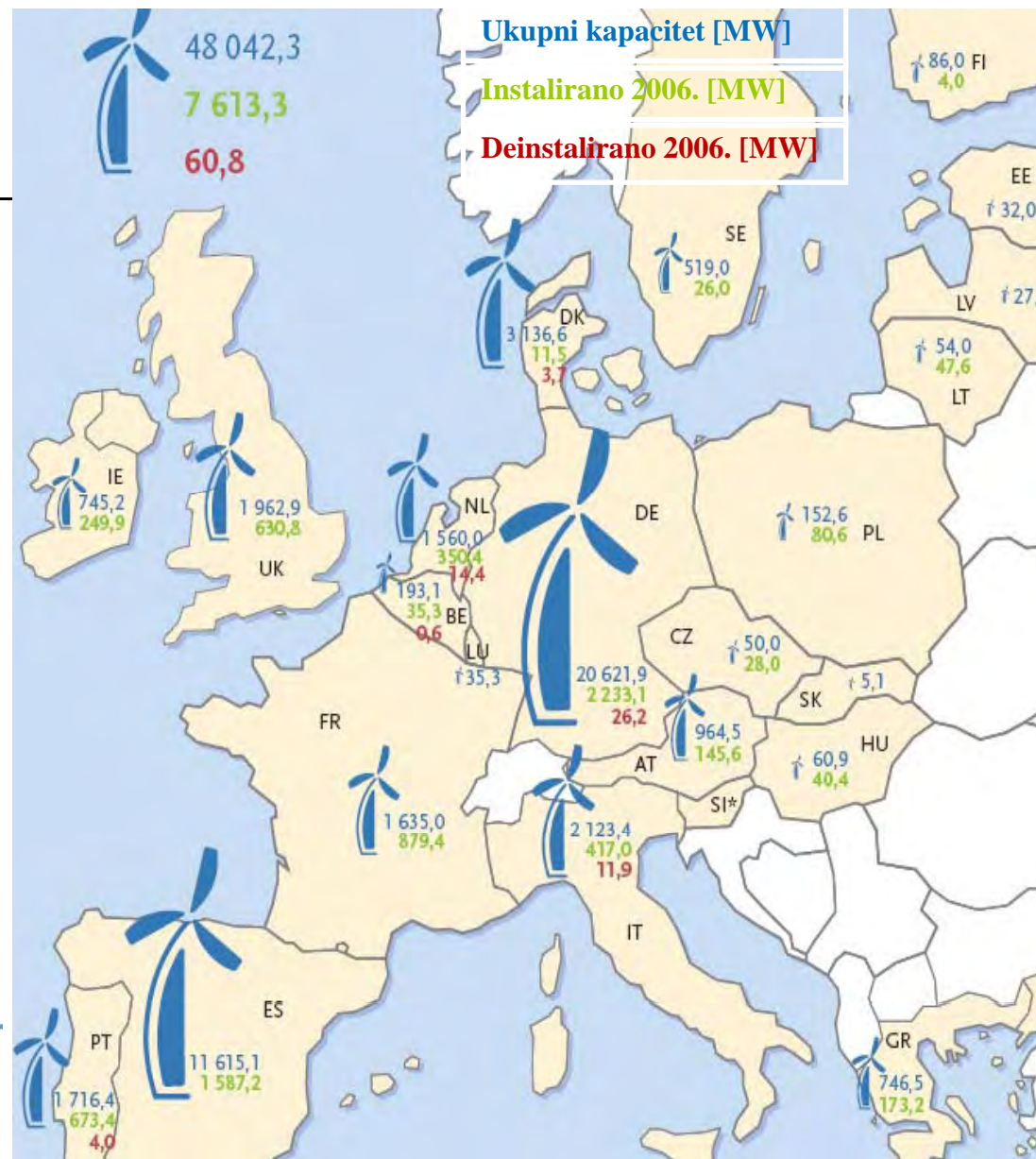
- Za 10 godina porast 20x
- Trenutno > 6 GW/god.,
> 11 milijardi €/god.
- Daljnji porast > 30 %

Energija vjetra 2006. skoro 73000 GW

BREAKDOWN OF WORLDWIDE WIND POWER AT THE END OF 2006

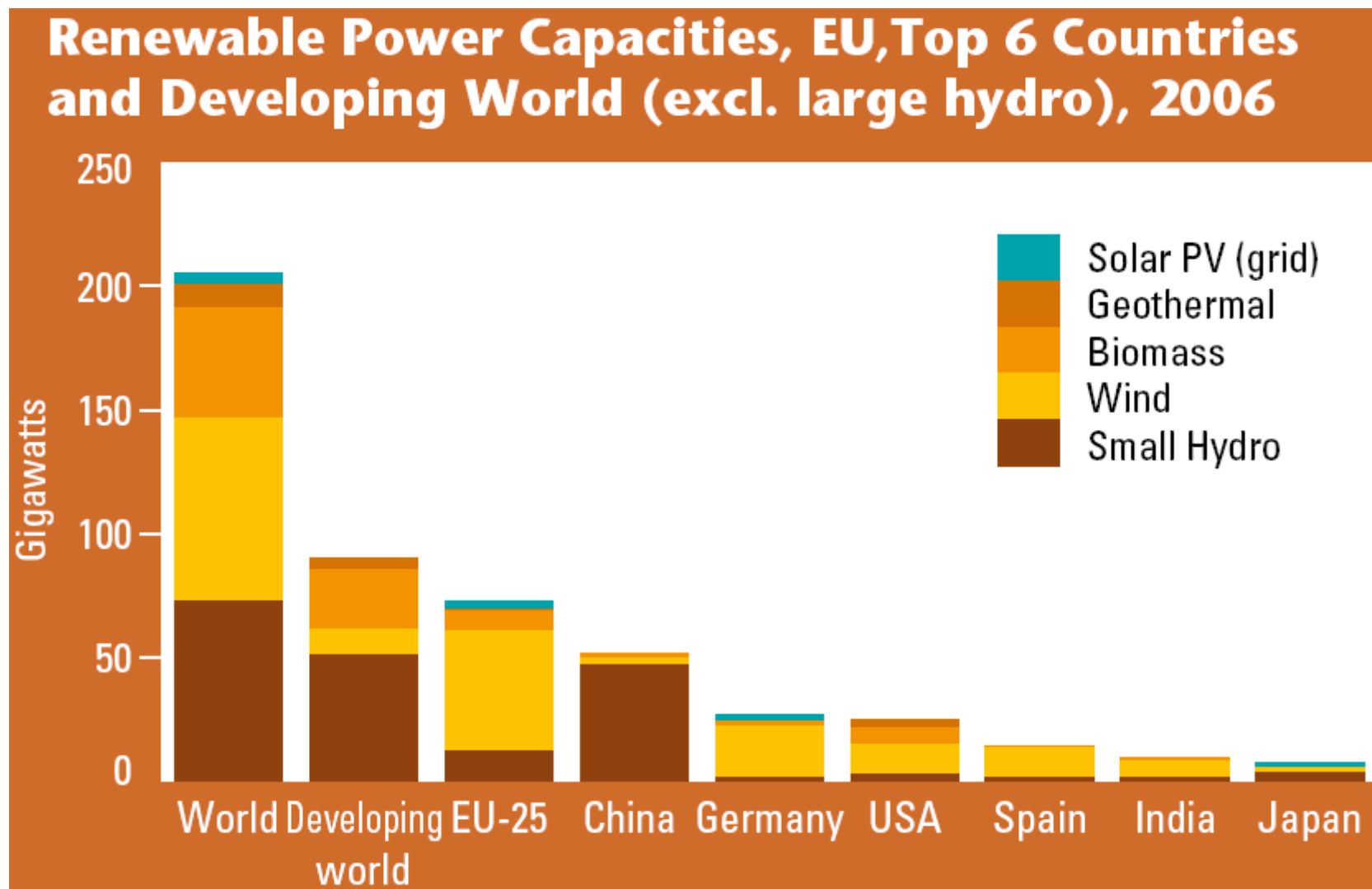


SOURCE : EUROSERVICES 2007



Instalirana snaga VE u Europi 2006.

Obnovljivi kapaciteti – bez velikih HE



Energija i snaga vjetra

- energija mase zraka je kinetička:

- masu zraka određuje gustoća, površina kroz koju struji, brzina i vrijeme: $m = \rho A v t$

$$E_k = \frac{m \cdot v^2}{2}$$

$$E_k = \frac{\rho \cdot A \cdot v^3}{2} \cdot t$$

- snaga vjetra:

- derivacija energije po vremenu, dE/dt :

$$P_{\text{vjetra}} = \frac{\rho \cdot A \cdot v^3}{2}$$

- gustoća zraka:

- ovisi o temperaturi, tlaku i vlažnosti

- za standardne uvjete na moru

- $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ (101,3 kPa i 15 °C)

- moguće je koristiti standardnu gustoću uz korekciju faktorom odstupanja (prosjeaka) stvarnog tlaka i temperature:

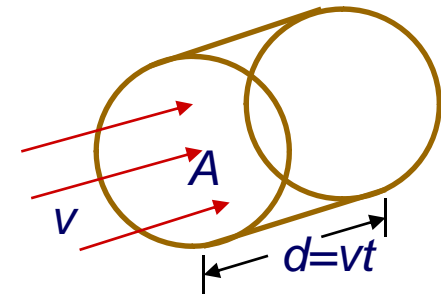
- unutar uobičajenih promjena temperature i tlaka gustoća varira do 10%

$$c_H = \frac{p}{101,3}$$

$$c_T = \frac{288,1}{T}$$

- brzina zraka:

- raste s visinom i vrlo promjenjiva

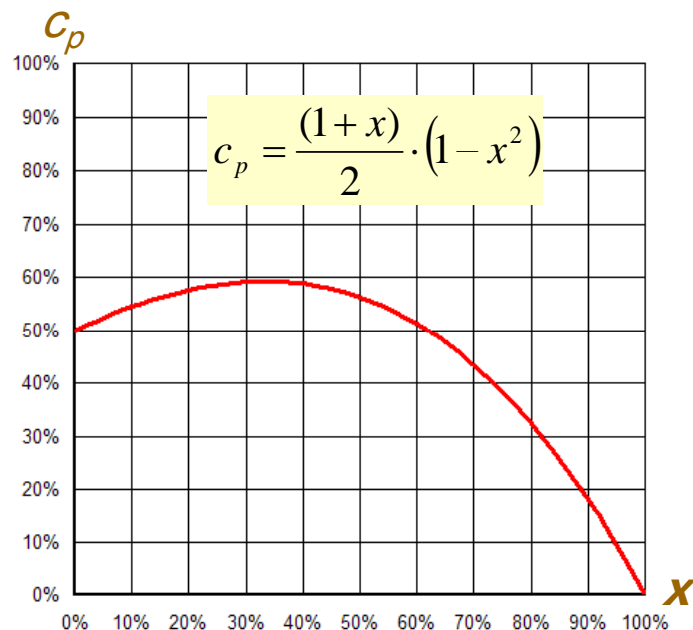
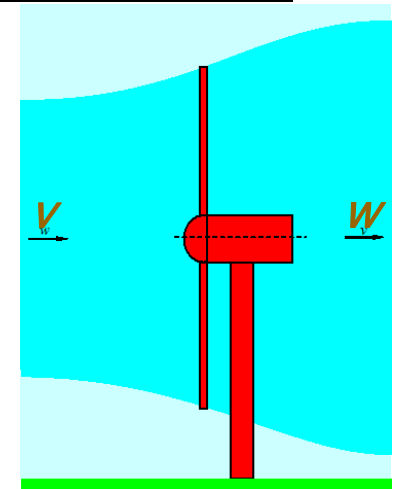


Teorijski iskoristiva snaga vjetra

Iskorištena snaga ovisi o brzini kojom vjetar dolazi (v) i brzini kojom odlazi (w):

- posebno odvajamo masu jer ovisi o prosjeku brzina:
- neka omjer brzina w/v bude x

$$P = \frac{\rho \cdot A}{2} \cdot \frac{(v + w)}{2} \cdot (v^2 - w^2) \quad P = \frac{\rho \cdot A}{2} \cdot v^3 \cdot \frac{(1 + x)}{2} \cdot (1 - x^2)$$

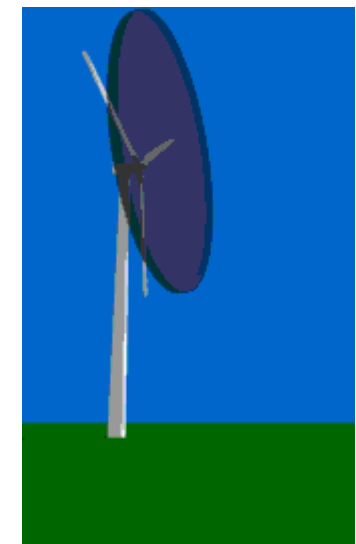


$$P = \frac{\rho \cdot A}{2} \cdot v^3 \cdot c_p$$

- za $x = w/v = 1/3$, c_p ima maksimalnu vrijednost $c_{p,max}$:

$$c_{p,Betz} = 16/27 = 59,3\%$$

- stvarni stupanj djelovanja je uvijek manji od maksimalnog



© 1998 www.WINDPOWER.org

Analitički izvod teorijskog maksimuma za c_p

Maksimalna snaga se dobije za maksimalni $c_p(x)$:

$$c_p(x) = \frac{(1+x)}{2} (1-x^2)$$

Maksimum za $c_p(x)$ se može naći u nul-točki derivacije funkcije $c_p(x)'$ izjednačene sa nulom:

$$[c_p(x)]' = \left[\frac{(1+x)}{2} (1-x^2) \right]'$$

$$0 = \frac{-2x + 1 - 3x^2}{2}$$

$$x_1 = -1 \quad x_2 = \frac{1}{3}$$

Prema tome, maksimalna teorijska snaga se postiže kada je brzina vjetra iza vjetrenjače jednaka trećini brzine ispred i iznosi 59,3% snage vjetra

$$c_p\left(\frac{1}{3}\right) = \frac{\left(1 + \frac{1}{3}\right)}{2} \left(1 - \left(\frac{1}{3}\right)^2\right) = \frac{16}{27} = 0,593$$

$$P_{\text{vjetr.teorij.maks}} = \frac{16}{27} P_{\text{vjetra}} = c_{p.Betz} \cdot P_v$$

Zadatak 1. Snaga vjetroagregata

Odrediti specifičnu i ukupnu električnu snagu vjetroagregata (VA) uz:
gust. zraka $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$;
brzinu vjetra $v = 12 \text{ m/s}$;
promjer lopatica $D = 50 \text{ m}$;
efikasnost $c_p = 0,4$
el. meh. stup. djelovanja $\eta = 0,8$

P, p

$$P = \eta \cdot c_p \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \text{ [W]}$$

$$p = P/A = \eta \cdot c_p \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot v^3 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

Rješenje:

$$p = 0,8 \cdot 0,4 \cdot 0,5 \cdot 1,225 \cdot 12^3 \\ = 0,8 \cdot 0,4 \cdot 1058 = 339 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

$$A = r^2 \cdot \pi = D^2 \cdot \pi / 4 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$P = p \cdot A = 339 \cdot 50^2 \cdot 3,14 / 4 \\ = 339 \cdot 1963 = 665 \text{ [kW]}$$

Za vježbu:

1. odrediti P i p uz $v = 9 \text{ m/s}$.
2. odrediti maksimalnu snagu uz iste brzine ($\eta = 1$ i $c_p = c_{p\text{Betz}}$)

Rj.:

$$P_{9\text{m/s}} = 280 \text{ kW}; \quad p_{9\text{m/s}} = 143 \text{ W/m}^2$$

$$P_{9\text{m/s.max}} = 520 \text{ kW}; \quad p_{9\text{m/s.max}} = 265 \text{ W/m}^2$$

$$P_{12\text{m/s.max}} = 1232 \text{ kW}; \quad p_{12\text{m/s.max}} = 628 \text{ W/m}^2$$

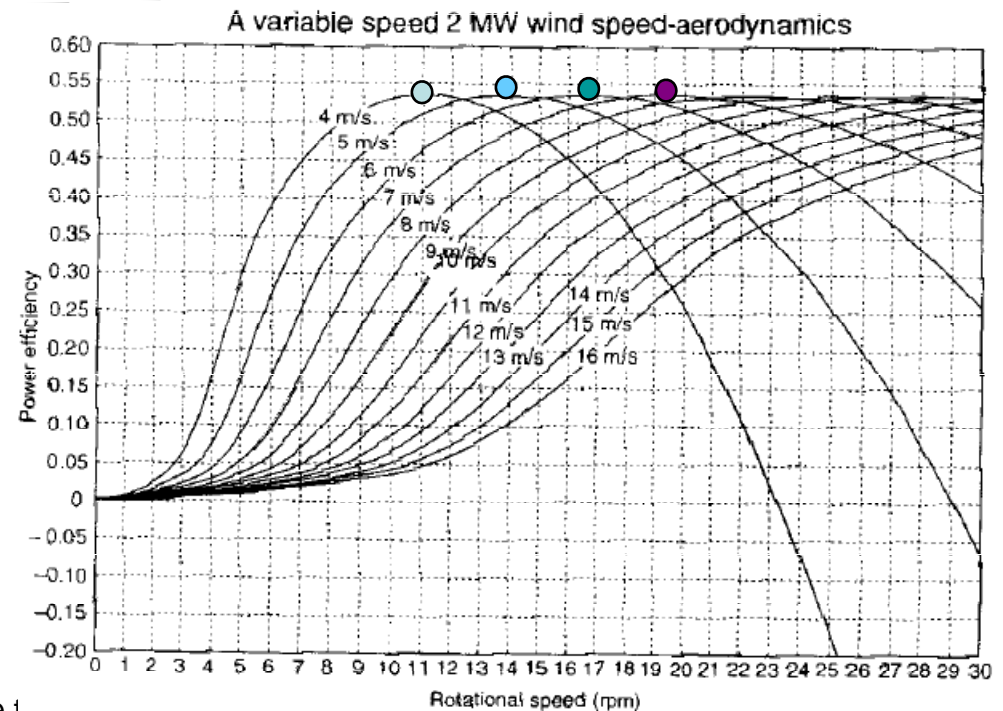
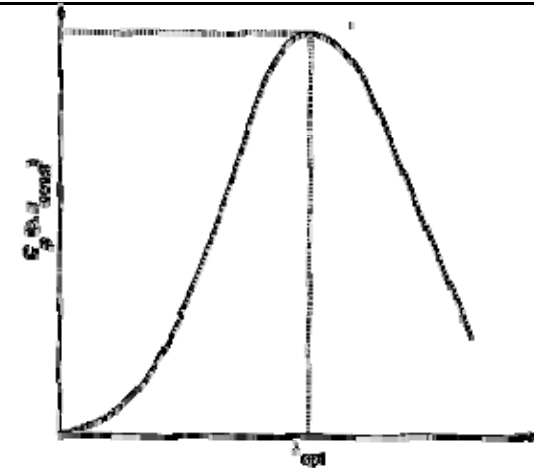
Snaga vjetroagregata za razne brzine

Utjecaj brzine vjetra na snagu odražava c_p :

- $c_p = \eta_{\text{vjetrenjače}} \cdot c_{p, \text{Betz}}$ ovisi o aerodinamici lopatica: brzina i položaj
- često se uzima ukupna vrijednost koja u sebi sadrži i stupnjeve djelovanja mehaničke i električne pretvorbe: $c_{pe} = \eta_e \cdot c_p$

$$P = c_{pe} \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 [W]$$

- uobičajeno je prikazivati c_p u ovisnosti o tzv. omjeru brzine vrha lopatice prema brzini vjetra (λ)
- promjena c_{pe} u ovisnosti o brzini okretanja rotora za različite brzine vjetra pokazuje pomicanje optimuma



Zadatak 1.a Snaga vjetroagregata

Odrediti specifičnu i ukupnu električnu snagu vjetroagregata (VA) uz:
gust. zraka $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$
 $p = 98,0 \text{ kPa}$, $\vartheta = 20 \text{ }^\circ\text{C}$
brzinu vjetra $v = 12 \text{ m/s}$
promjer rotora $D = 50 \text{ m}$
el. efikasnost $c_{pe} = 0,34$

P, p

$$P = c_{pe} \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot c_k [\text{W}]$$

$$p = P/A = c_{pe} \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot v^3 \cdot c_k [\text{W/m}^2]$$

$$c_k = c_H \cdot c_T = 98,0/101,3 \cdot 288,1/293,15 \\ = 0,967 \cdot 0,983 = 0,95$$

Rješenje:

$$p = 0,34 \cdot 0,5 \cdot 1,225 \cdot 12^3 \cdot 0,95 \\ = 0,34 \cdot 1058 \cdot 0,95 = 342 [\text{W/m}^2]$$

$$A = r^2 \cdot \pi = D^2 \cdot \pi / 4 [\text{m}^2]$$

$$P = p \cdot A = 342 \cdot 50^2 \cdot 3,14/4 \\ = 342 \cdot 1963 = 671 [\text{kW}]$$

Za vježbu:

- odrediti P i p uz $v = 9 \text{ m/s}$.
- odrediti maksimalnu snagu uz iste brzine ($c_{pe} = c_{pB}$)

Rj.:

$$P_{9\text{m/s}} = 382 \text{ kW}; \quad p_{9\text{m/s}} = 144 \text{ W/m}^2$$

$$P_{9\text{m/s.max}} = 525 \text{ kW}; \quad p_{9\text{m/s.max}} = 267 \text{ W/m}^2$$

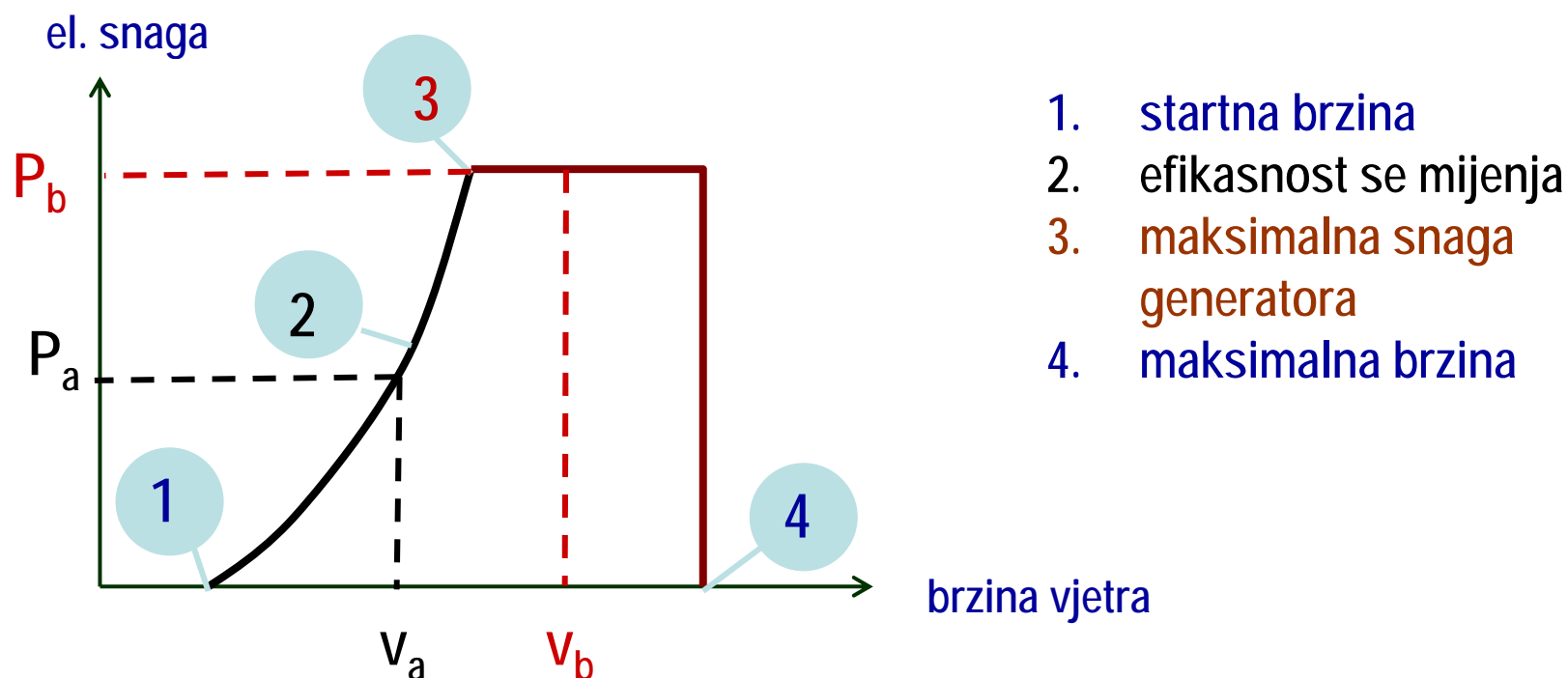
$$P_{12\text{m/s.max}} = 1243 \text{ kW}; \quad p_{12\text{m/s.max}} = 634 \text{ W/m}^2$$

Električna snaga vjetroagregata

Snaga vjetra proporcionalna je :

- gustoći zraka
- trećoj potenciji brzine vjetra

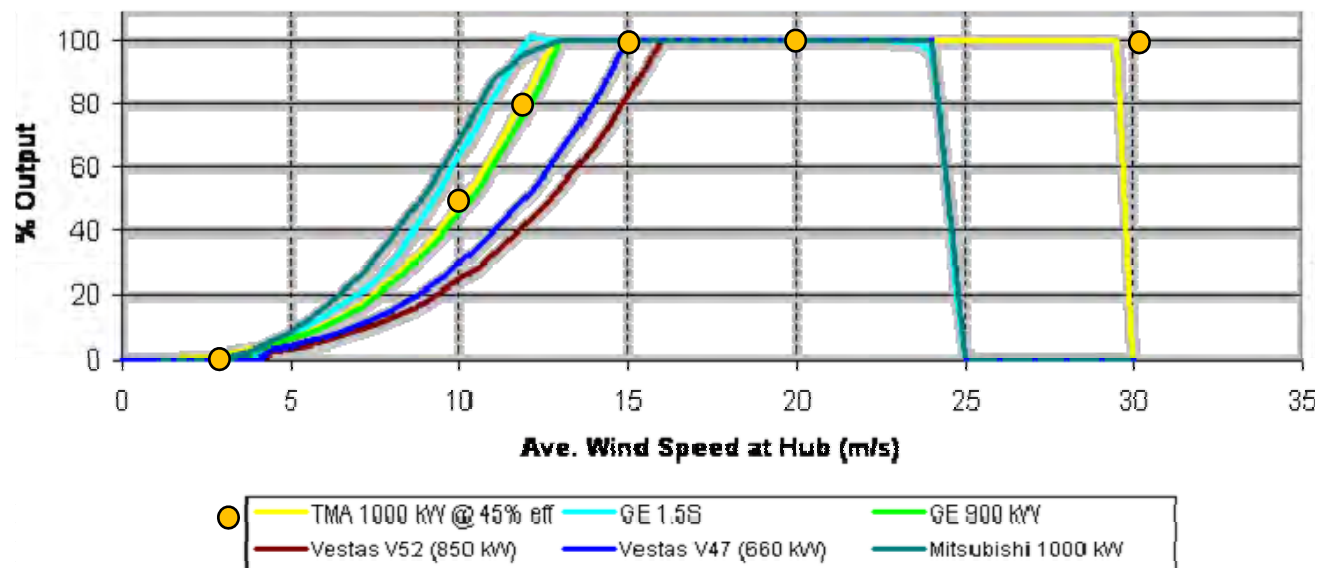
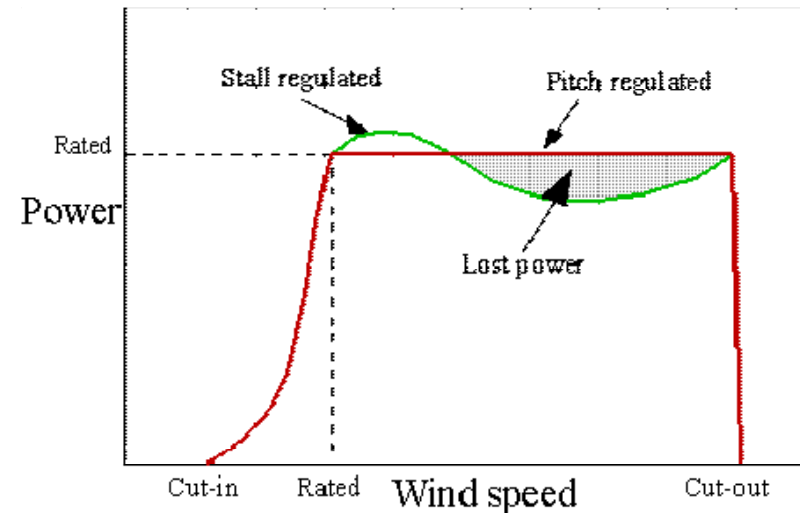
Dobivena snaga iz vjetra određena je brzinom vjetra i karakteristikom vjetroagregata:



Ovisnost snage VA o brzini vjetra

- Svaki VA ima karakteristiku snage u ovisnosti o brzini vjetra
- Karakteristika snage ovisi o tehničkoj izvedbi
 - pasivna samoregulacija (*stall*)
 - aktivna regulacija (*pitch*)

Fig 3.2.4 - Power curves for stall and pitch regulated machines



Zadatak 2. Snaga vjetroatregata

Odrediti električnu snagu vjetroatregata (VA) za šest točaka iz krivulje snage:

nazivna snaga $P_n = 2 \text{ MW}$

brzina vjetra:

3, 10, 12, 15, 20 i 30 m/s

postotak nazivne snage:

0, 50, 80, 100, 100 i 0 %

 P_i

$$P_i = C_{i.pns} \cdot P_n$$

Rješenje:

$$P_3 = 0 \cdot 2 = 0$$

$$P_{10} = 0,5 \cdot 2 = 1,0 \text{ MW}$$

$$P_{12} = 0,8 \cdot 2 = 1,6 \text{ MW}$$

$$P_{15} = 1 \cdot 2 = 2,0 \text{ MW}$$

$$P_{20} = 1 \cdot 2 = 2,0 \text{ MW}$$

$$P_{30} = 0 \cdot 2 = 0$$

Za vježbu:

- odrediti snagu vjetra i c_{pe} za sve brzine vjetra

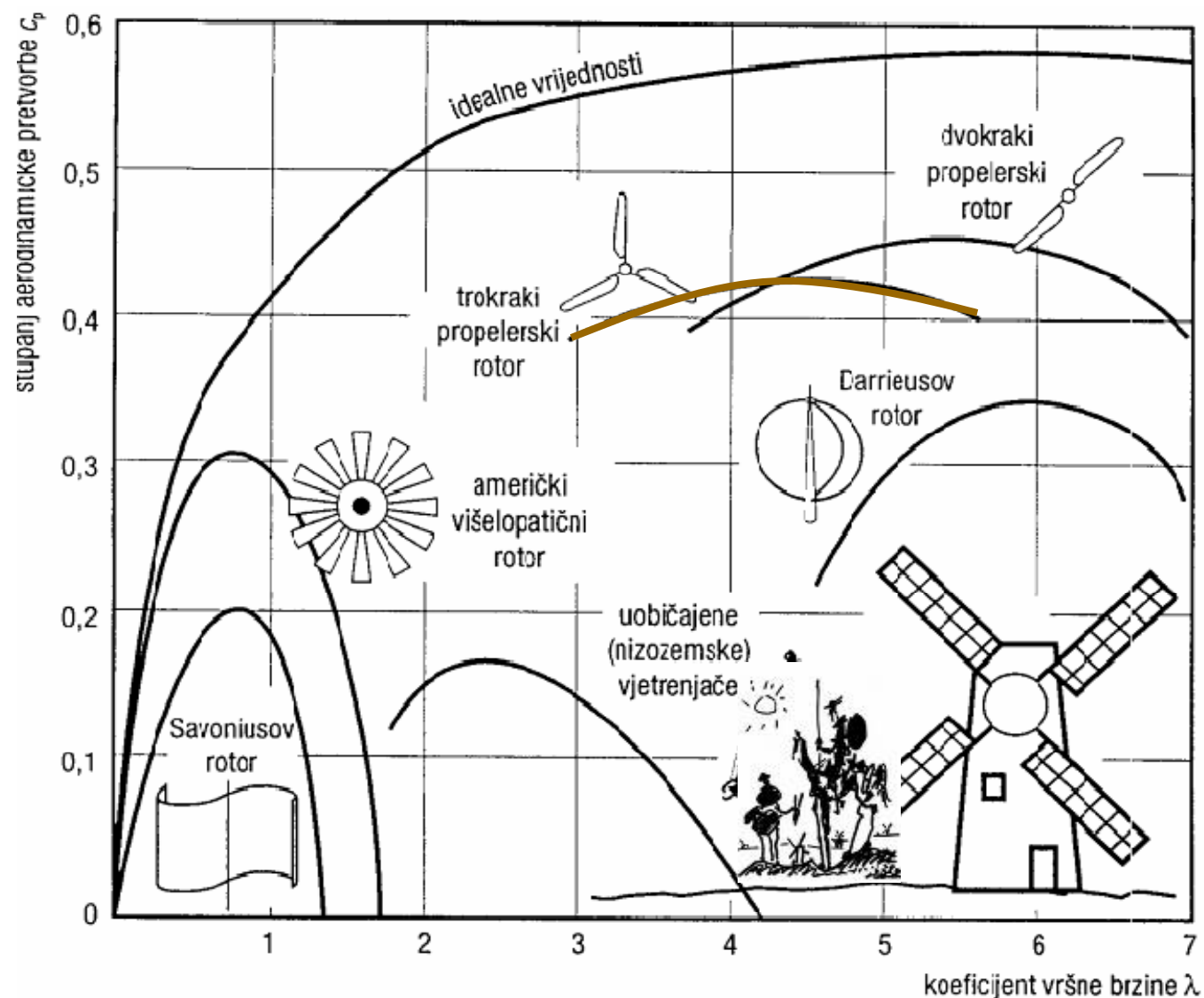
Računati za promjer lopatica 70 m i standardnu gustoću zraka

Rj.:

$$P_{10.vetra} = 2,357 \text{ MW}; \quad c_{10.pe} = 0,42$$

$$P_{15.vetra} = 7,955 \text{ MW}; \quad c_{15.pe} = 0,25$$

Koeficijent c_p ovisi o izvedbi vjetroagregata



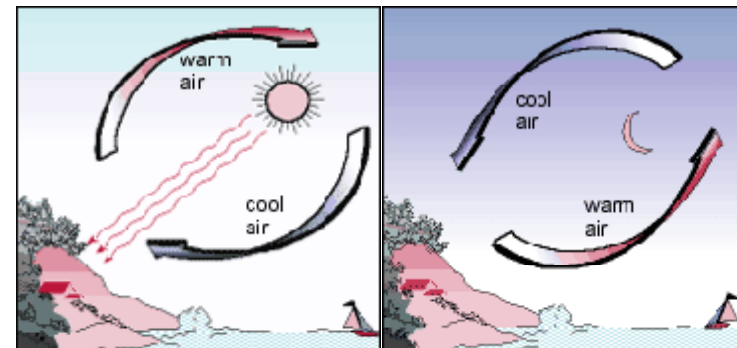
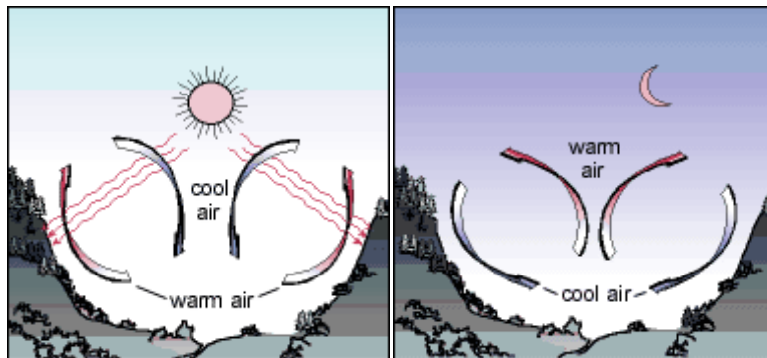
Moderni VA
sa tri lopatice



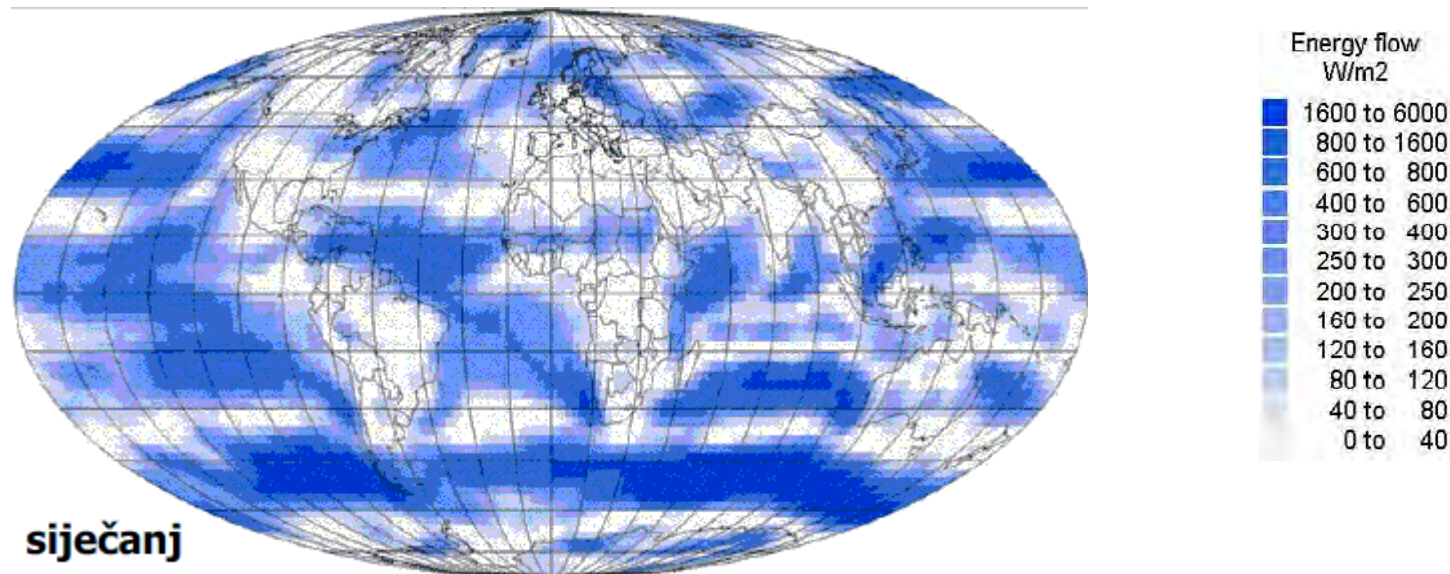
Energija vjetra – brzina

Vjetar je masa zraka u pokretu:

- uzrokuje ga razlika tlakova (rezultat razlike temperatura)
- posljedica sunčeve energije (1 do 2 %)
- značajan utjecaj rotacije Zemlje i konfiguracije tla

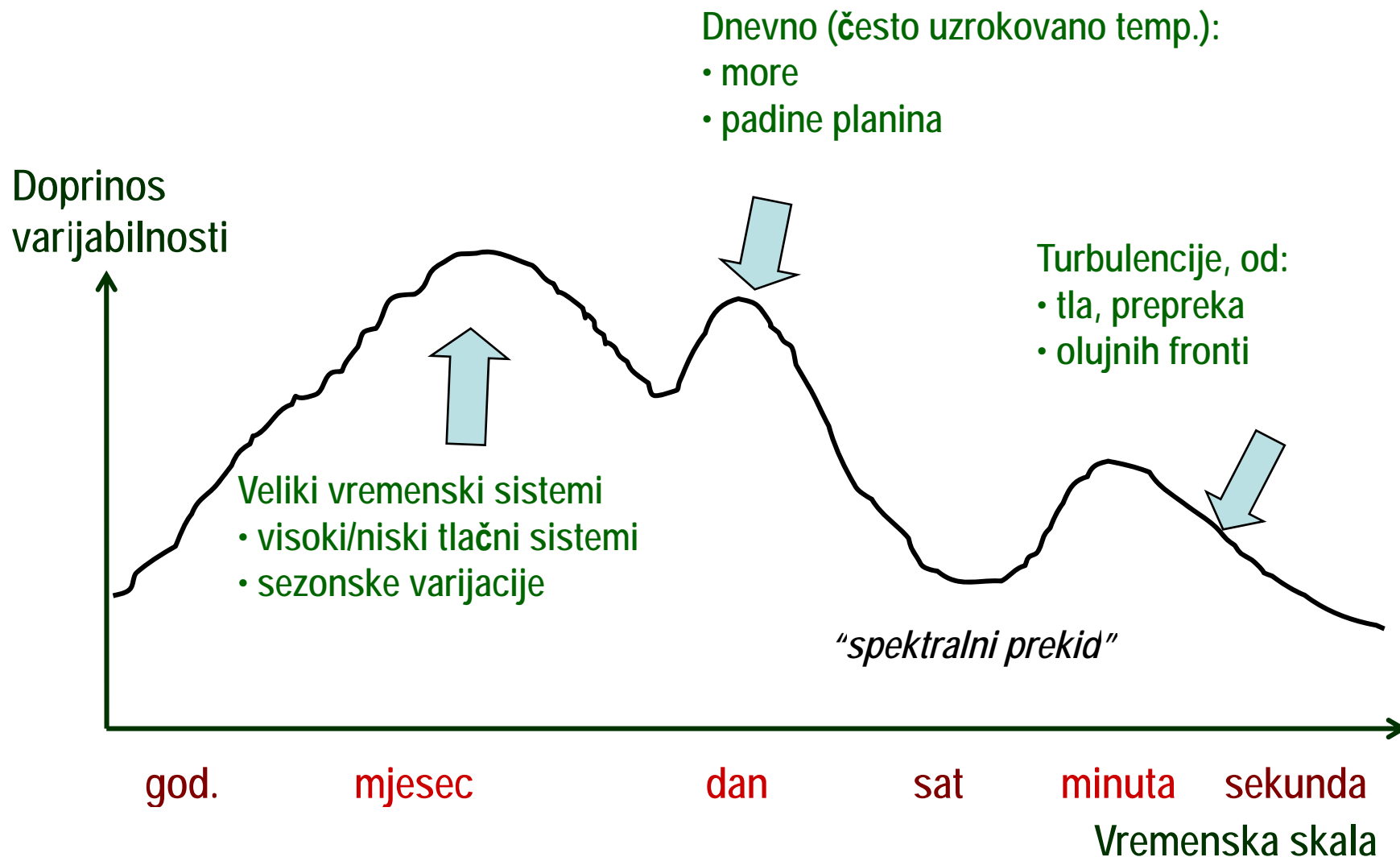


Snaga vjetra: globalno na 70 m



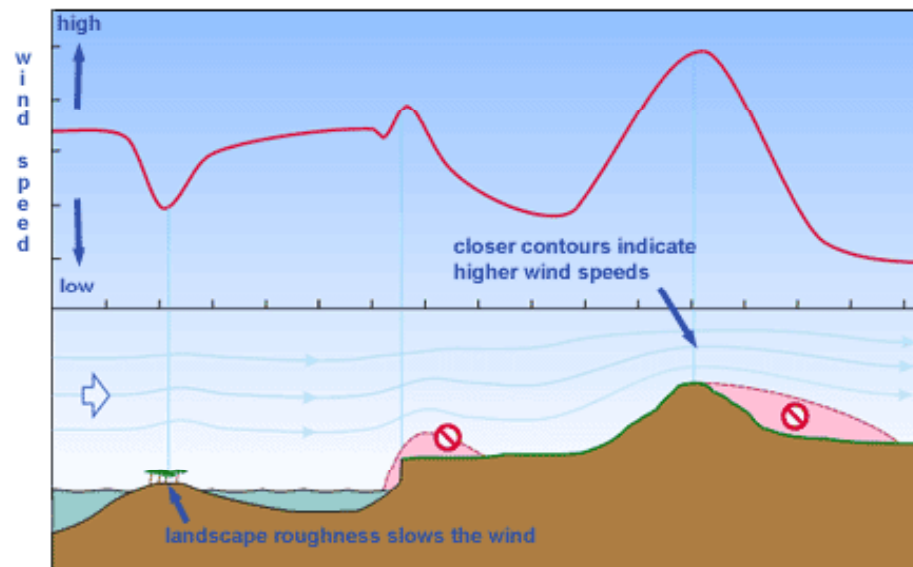
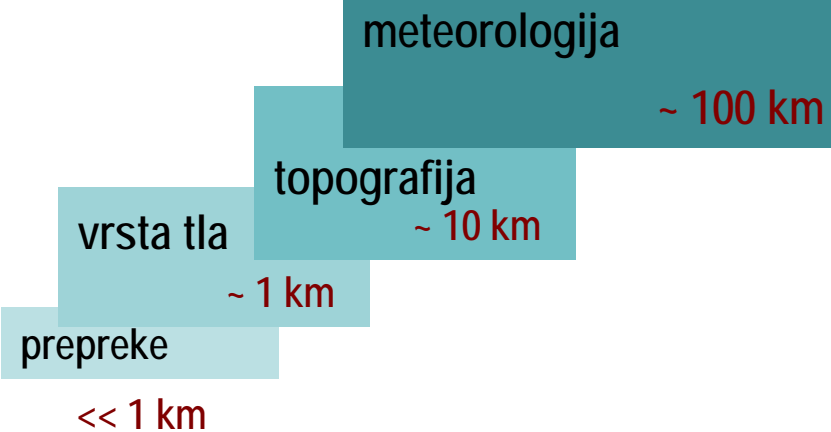
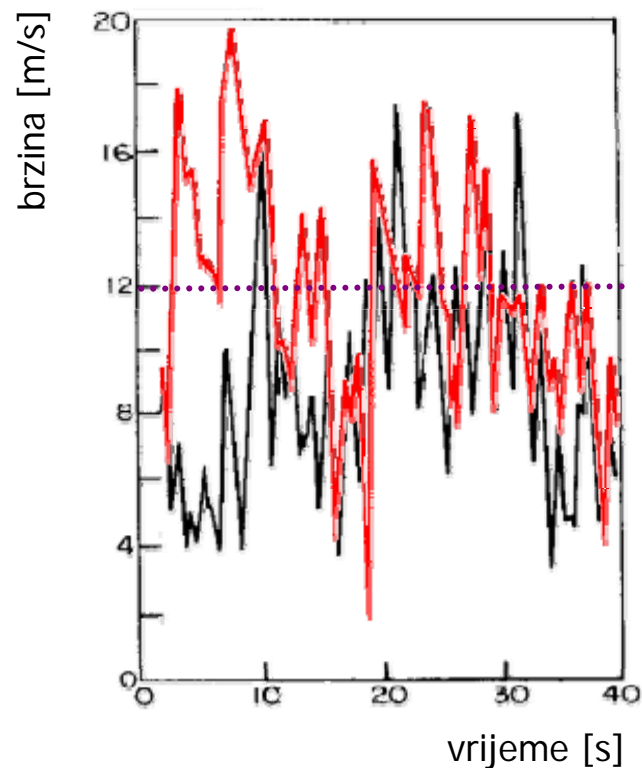
B. Sørensen: Renewable Energy, Figure 3.27. Maps of wind power regimes for January, April, July and October 1997, based on NCEP/NCAR (1998). The power levels are estimated for a height of 70 m above ground, presently a typical hub height for wind turbines. The method of estimation is explained in section 6.2.5 (these and following area-based geographical information system (GIS) maps are from Sørensen and Meibom (1998), copyright B. Sørensen).

Spektar varijabilnost vjetra u vremenu



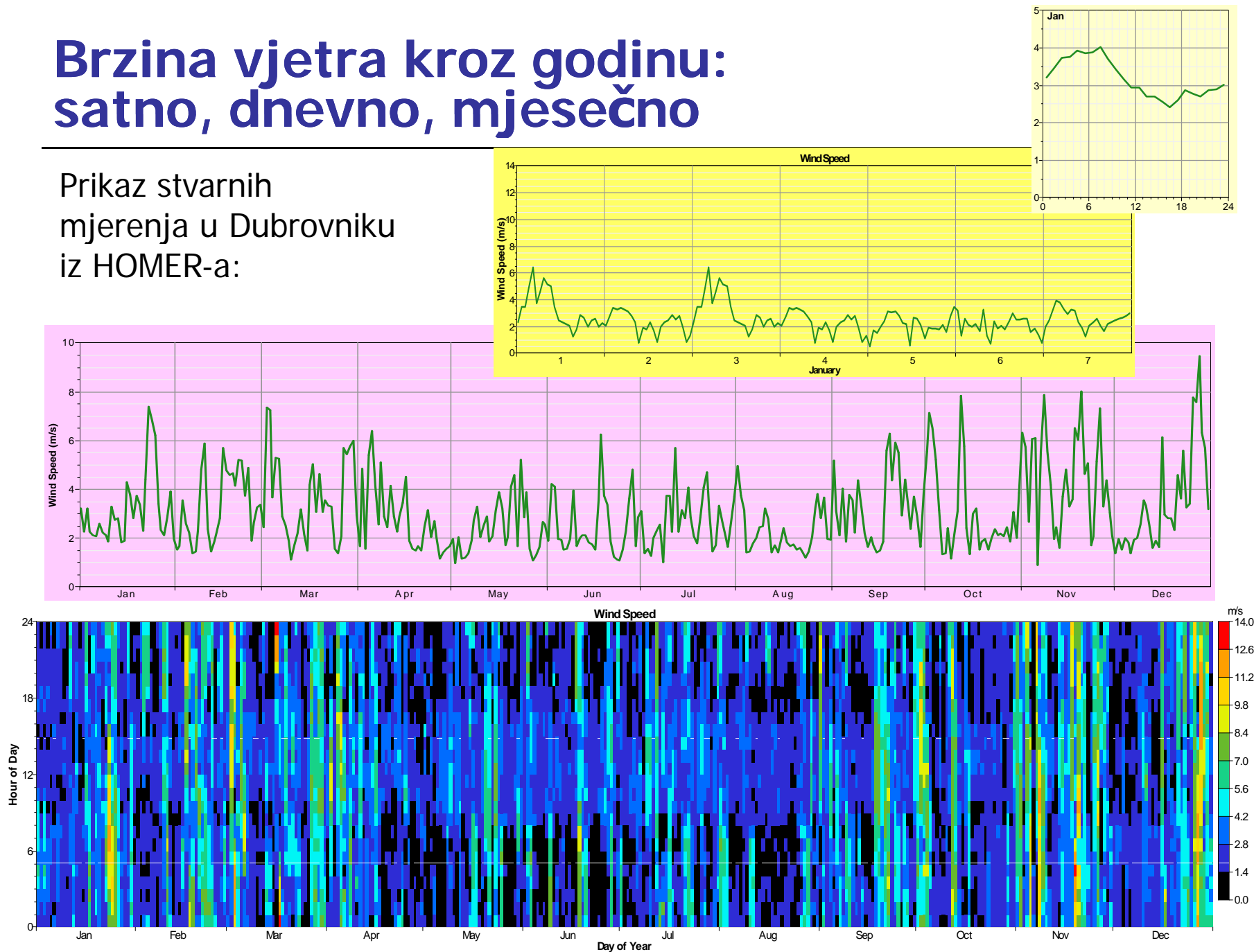
Varijabilnost vjetra u prostoru

Kratkotrajne varijacije brzine vjetra na dvije lokacije mogu biti korisne za smanjivanje ukupne varijabilnosti proizvedene energije.
Primjer za dvije lokacije udaljene 90 m:



Brzina vjetra kroz godinu: satno, dnevno, mjesečno

Prikaz stvarnih
mjerjenja u Dubrovniku
iz HOMER-a:

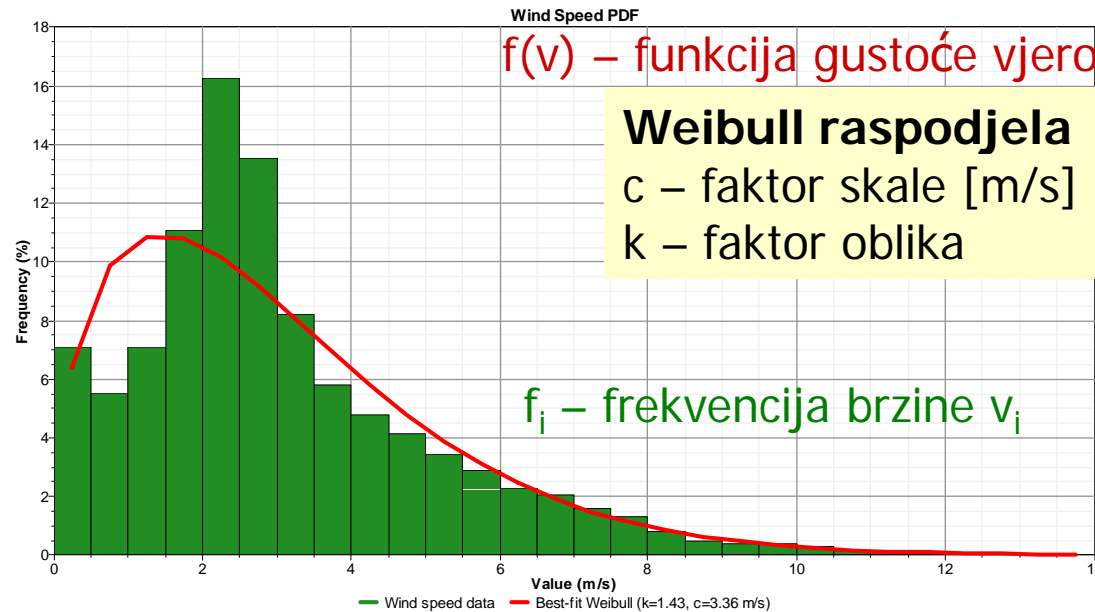


2008.

Energijske tehnologije: Energija vjetra

25

Brzina vjetra prikazana statistički



$f(v)$ – funkcija gustoće vjerojatnosti pojavljivanja brzine v

Weibull raspodjela

c – faktor skale [m/s]

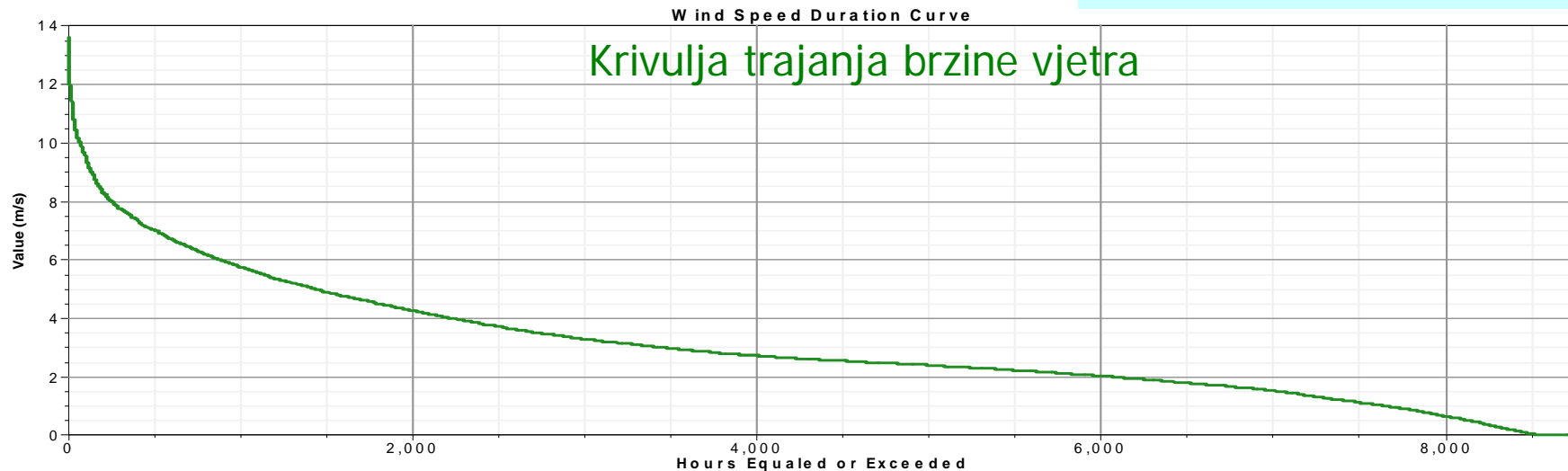
k – faktor oblika

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

Rayleigh raspodjela

za $k = 2$ u Weibullovoj

$$f(v) = \frac{2v}{c^2} \exp \left[- \left(\frac{v}{c} \right)^2 \right]$$



Raspodjele brzine vjetra i aproksimacija

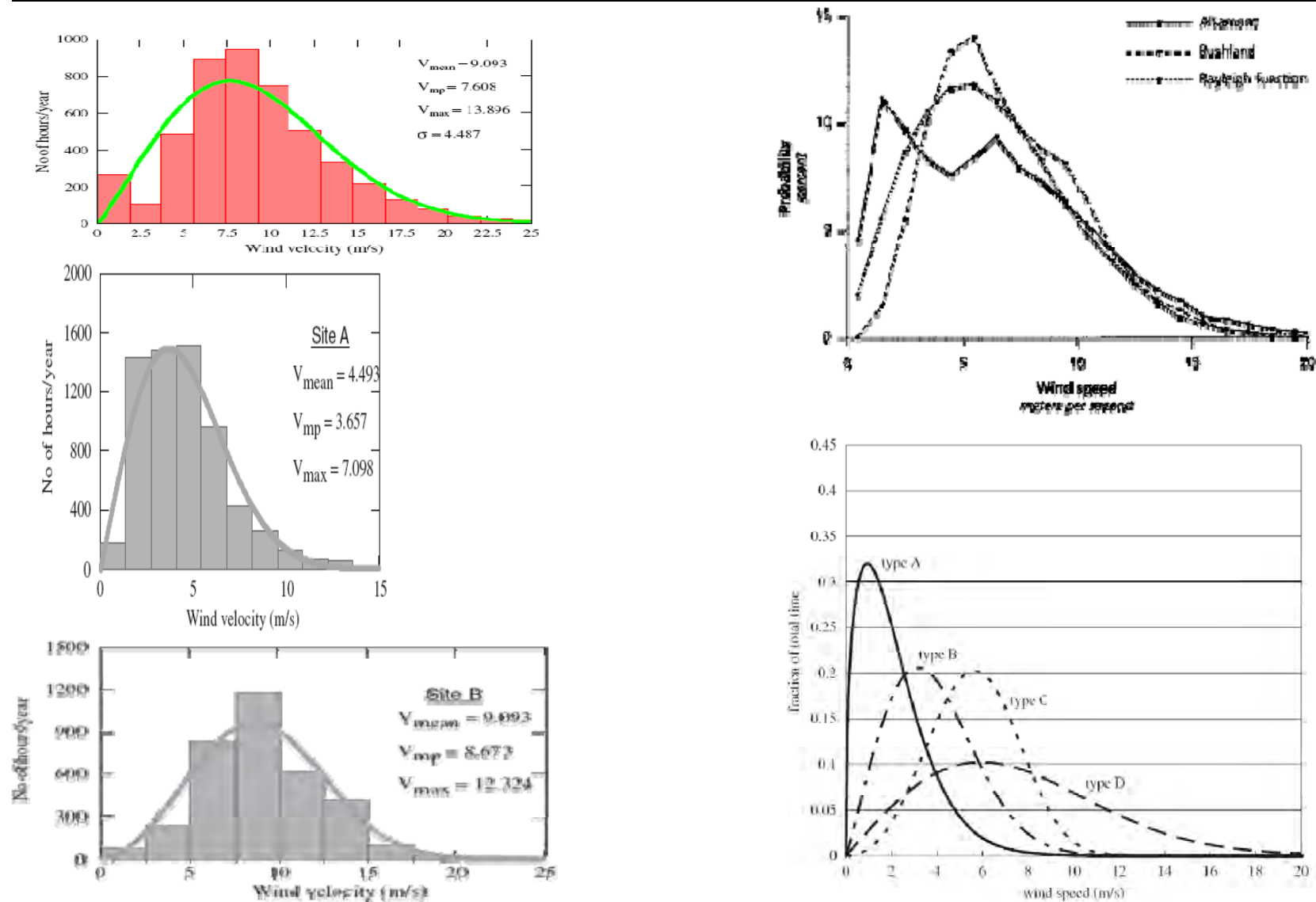
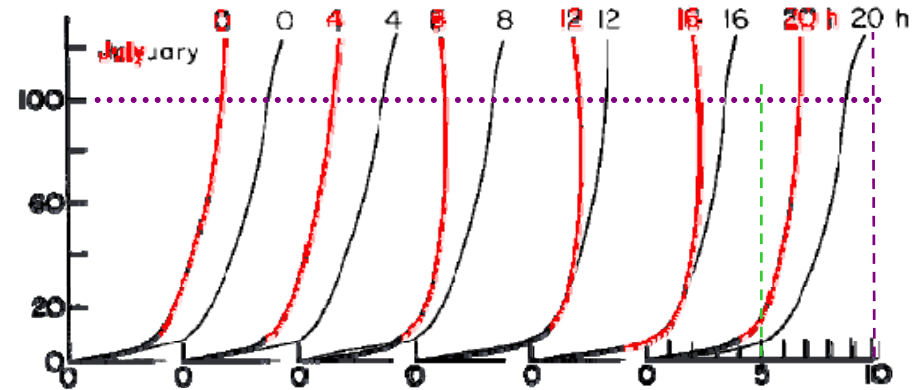


Fig. 4. Representative types of wind distributions.

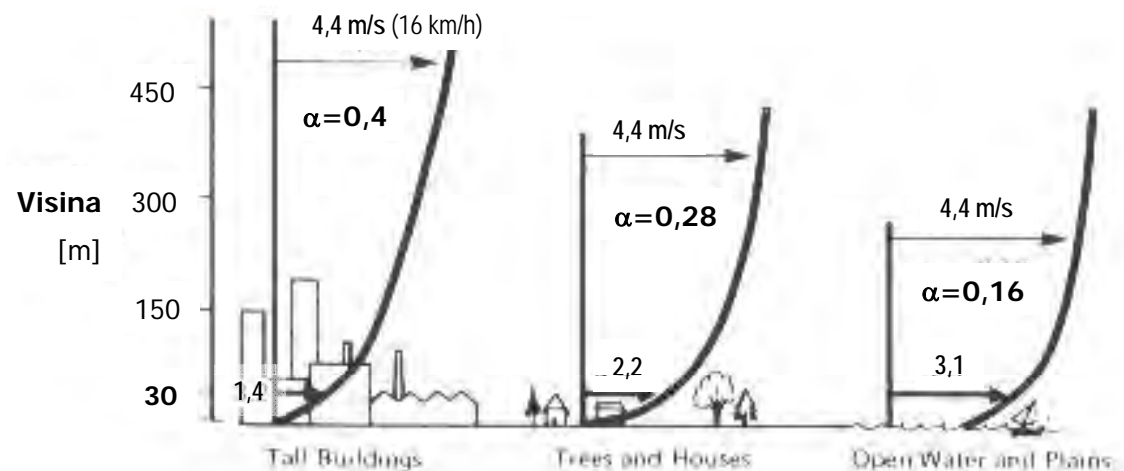
Brzina vjetra u ovisnosti o visini

- Brzina se vjetra povećava s visinom
 - to ovisi o konfiguraciji tla, temperaturi i tlaku
 - važno za procjenu brzine na raznim visinama jer određuje snagu i naprezanje VA
- Jednostavan model preko koeficijenta terena α :
 - mirna voda i glatko i tvrdo tlo: $\alpha=0,10$
 - visoka trava $\alpha=0,15$
 - šumovito $\alpha=0,25$
 - grad sa velikim zgradama $\alpha=0,40$

$$v_H = v_0 \left(\frac{H}{H_0} \right)^\alpha$$



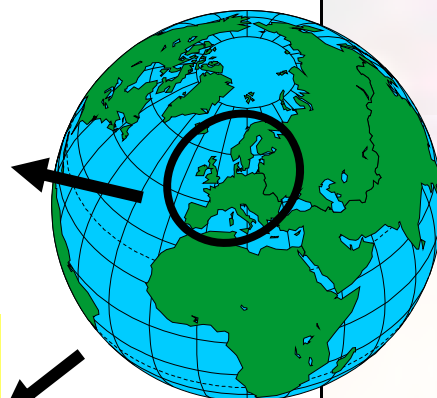
Varijacija brzine vjetra [m/s] s visinom [m] ovisno o dobu dana i godišnjem dobu (siječanj – crno i srpanj – crveno). (B. Sørensen: Renewable Energy).



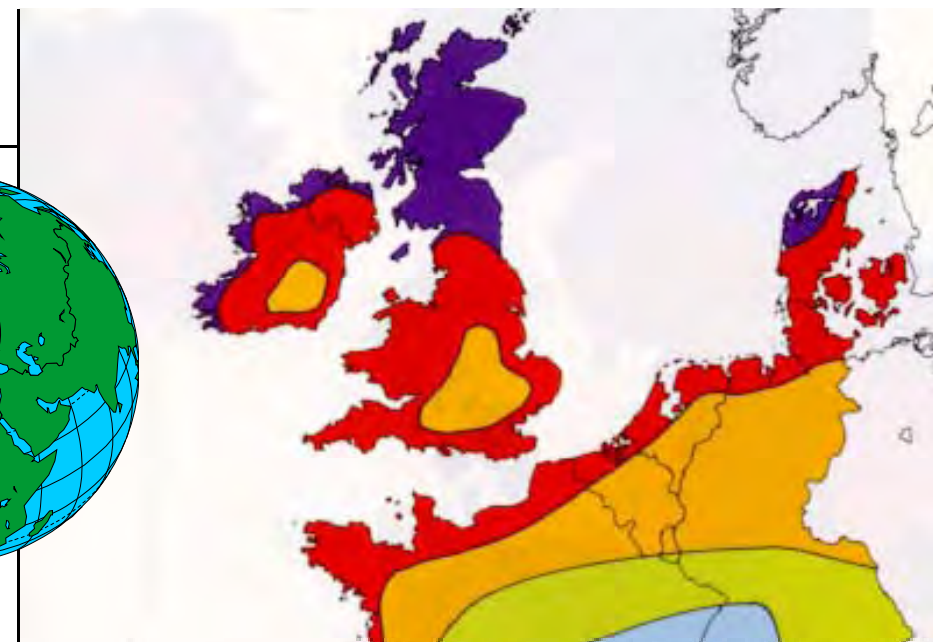
Atlas vjetra i potencijal energije

Europa	TWh/god.
kopno	500
pučina	2000
potrošnja ⁽¹⁾	3000

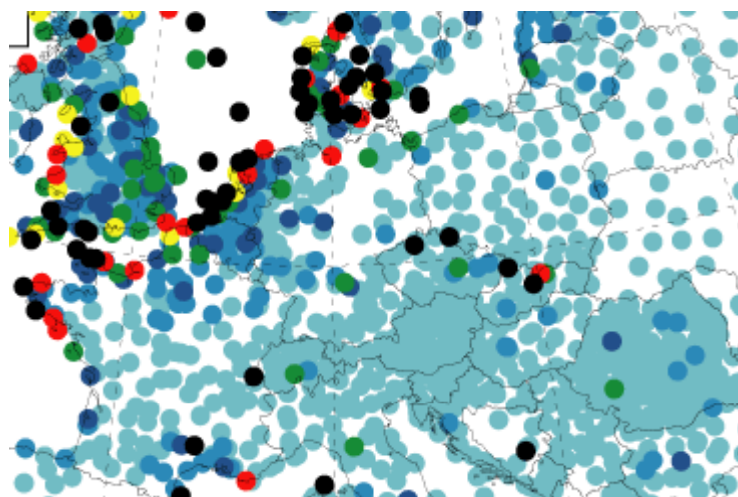
Svijet	TWh/god.
potencijal ⁽²⁾	25000
potrošnja ⁽¹⁾	15000



(1) Približno za 2003.
(2) Samo kopno.



	Sheltered terrain ²		Open plain ³		At a sea coast ⁴	
	m s^{-1}	Wm^{-2}	m s^{-1}	Wm^{-2}	m s^{-1}	Wm^{-2}
	> 6.0	> 250	> 7.5	> 500	> 8.5	> 700
	5.0-6.0	150-250	6.5-7.5	300-500	7.0-8.5	400-700
	4.5-5.0	100-150	5.5-6.5	200-300	6.0-7.0	250-400
	3.5-4.5	50-100	4.5-5.5	100-200	5.0-6.0	150-250
	< 3.5	< 50	< 4.5	< 100	< 5.0	< 150



Wind classes at 80 m	
1	($V < 5.9 \text{ m/s}$)
2	($5.9 \leq V < 6.9 \text{ m/s}$)
3	($6.9 \leq V < 7.5 \text{ m/s}$)
4	($7.5 \leq V < 8.1 \text{ m/s}$)
5	($8.1 \leq V < 8.6 \text{ m/s}$)
6	($8.6 \leq V < 9.4 \text{ m/s}$)
7	($V \geq 9.4 \text{ m/s}$)

Kako dobiti statistiku vjetra za lokaciju?



Dostupnost dugoročnih podataka

gdje?

- nacionalni sustav meteo mjerenja brzine vjetra
- posebne namjene (nautika, avijacija, poljoprivreda)
- korištenje vjetra od ranih 80-ih

pouzdana?

- preciznost anemometara
- pohrana i obrada podataka
- konzistentnost i povijest lokacije

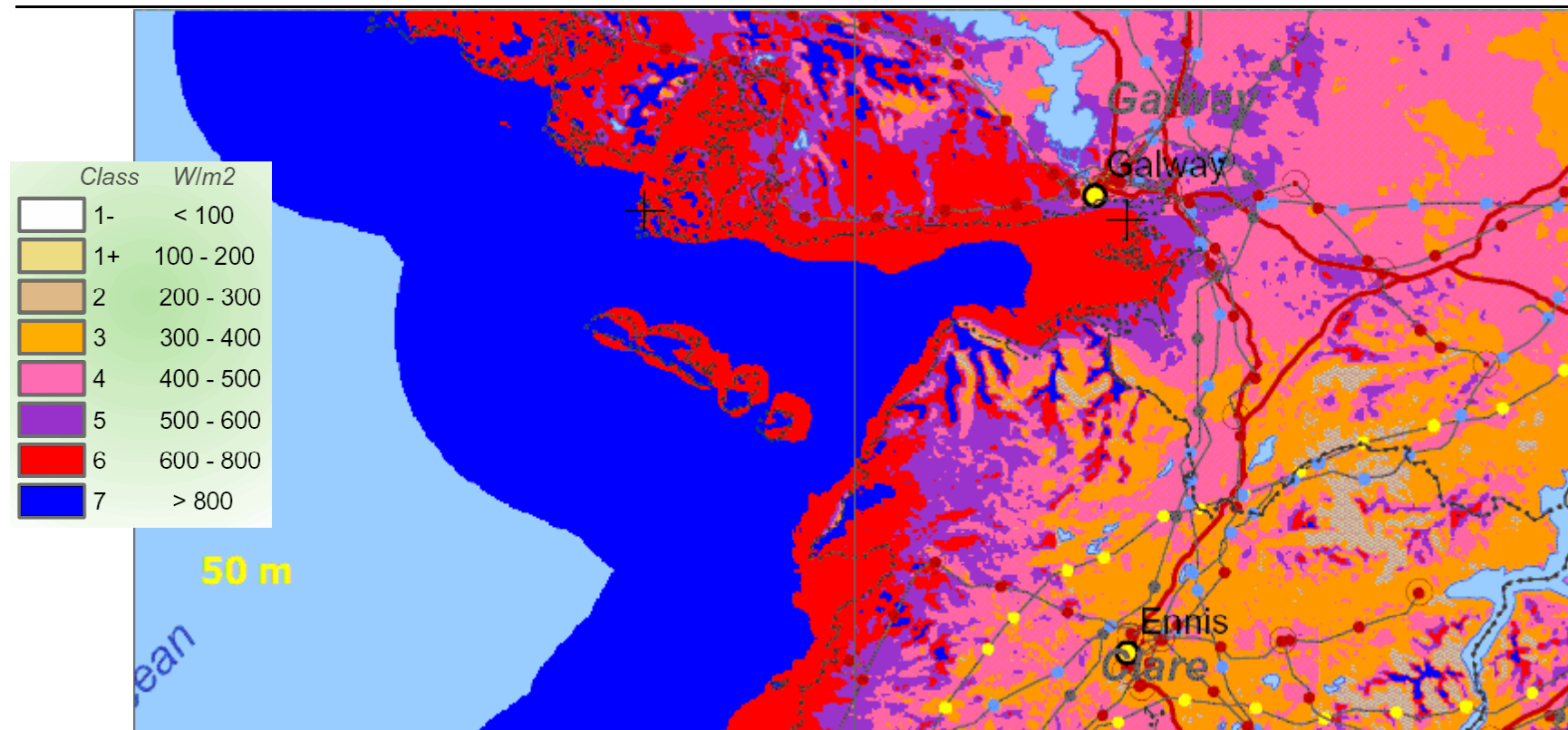
reprezentativno?

- prepreke, vrsta tla
- primjena korekcija

korisno?

- format podataka: samo godišnji prosjeci ili duge vremenske serije
- dugotrajno mjerenje

Procjena snaga vjetra lokalno na tri visine



Irska: na 50, 75 i 100 m; 75x150 km

Zadatak 3. Energija vjetra u prosjeku

Odrediti ukupnu specifičnu maksimalno iskoristivu energiju vjetra za dvije brzine:

gust. zraka $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$;

brzinu vjetra $v_1 = 4 \text{ m/s}$;

brzinu vjetra $v_2 = 9 \text{ m/s}$;

trajanje vjetra v_1 $t_1 = 750 \text{ h}$;

trajanje vjetra v_2 $t_2 = 750 \text{ h}$;

W_{1i2}

$$W = C_{p.\max} \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot v^3 \cdot t \quad [\text{Wh/m}^2]$$

$$C_{p.\max} = C_{p.\text{betz}} = 16/27 = 0,593$$

Rješenje (KRIVO):

$$\begin{aligned} W_{1i2} &= C_{p.\max} \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot v_{\text{prosj}}^3 \cdot t_{\text{ukupno}} \\ &= 0,593 \cdot 0,5 \cdot 1,225 \cdot 6,5^3 \cdot 1500 \\ &= 149621 [\text{Wh/m}^2] = \mathbf{150} [\text{kWh/m}^2] \end{aligned}$$

ISPRAVNO:

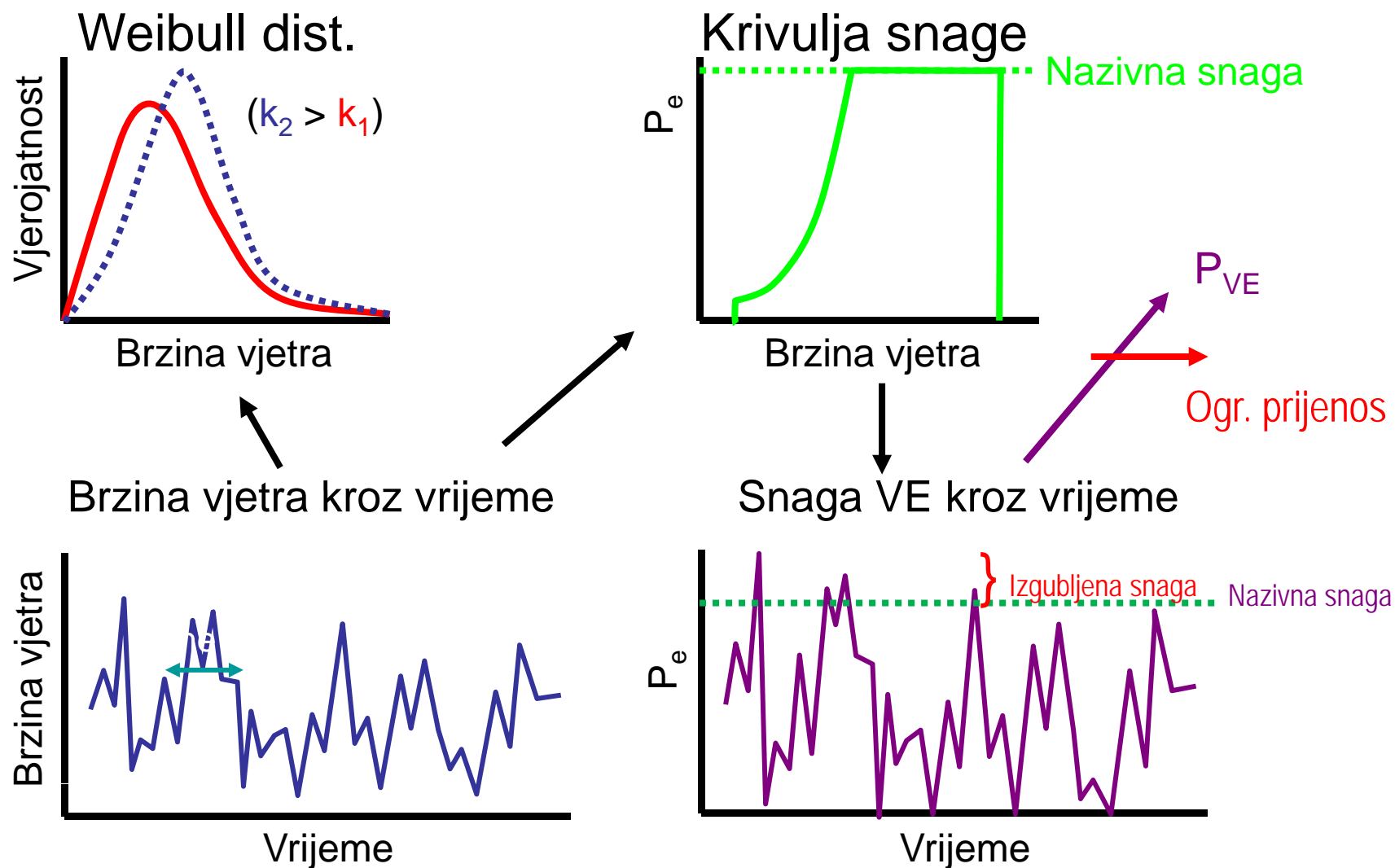
$$\begin{aligned} W_{1i2} &= W_1 + W_2 \\ &= C_{p.\max} \cdot 0,5 \cdot \rho \cdot (v_1^3 \cdot t_1 + v_2^3 \cdot t_2) \\ &= 0,593 \cdot 0,5 \cdot 1,225 \cdot (4^3 \cdot 750 + 9^3 \cdot 750) \\ &= 216020 [\text{Wh/m}^2] = \mathbf{216} [\text{kWh/m}^2] \end{aligned}$$

Za vježbu:

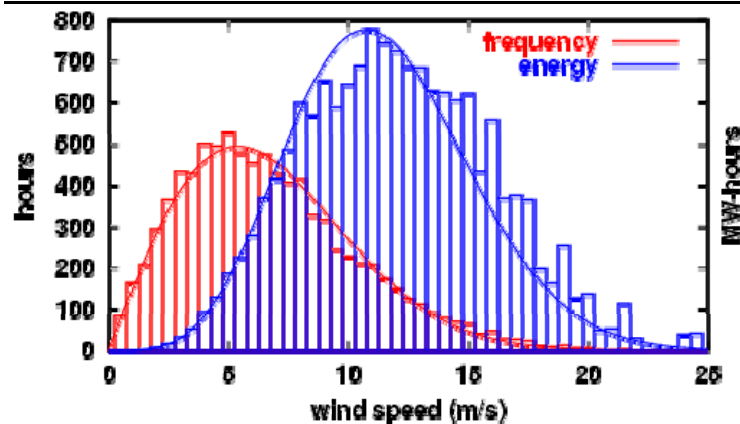
Odrediti prosječnu brzinu koja daje ispravan rezultat i energiju koju bi proizvela VE sa promjerom lopatica 50 m te prosječnim $c_{pe} = 0,35$.

$$\begin{aligned} \text{Rj.: } V_{12.\text{sr.kub.brzina}} &= 9,256 \text{ m/s} \\ W_{1i2} &= 424115 \text{ KWh} \end{aligned}$$

Procjena proizvedene električne energije u vjetroelektrani



Procjena proizvodnje električne energije u vjetroagregatu

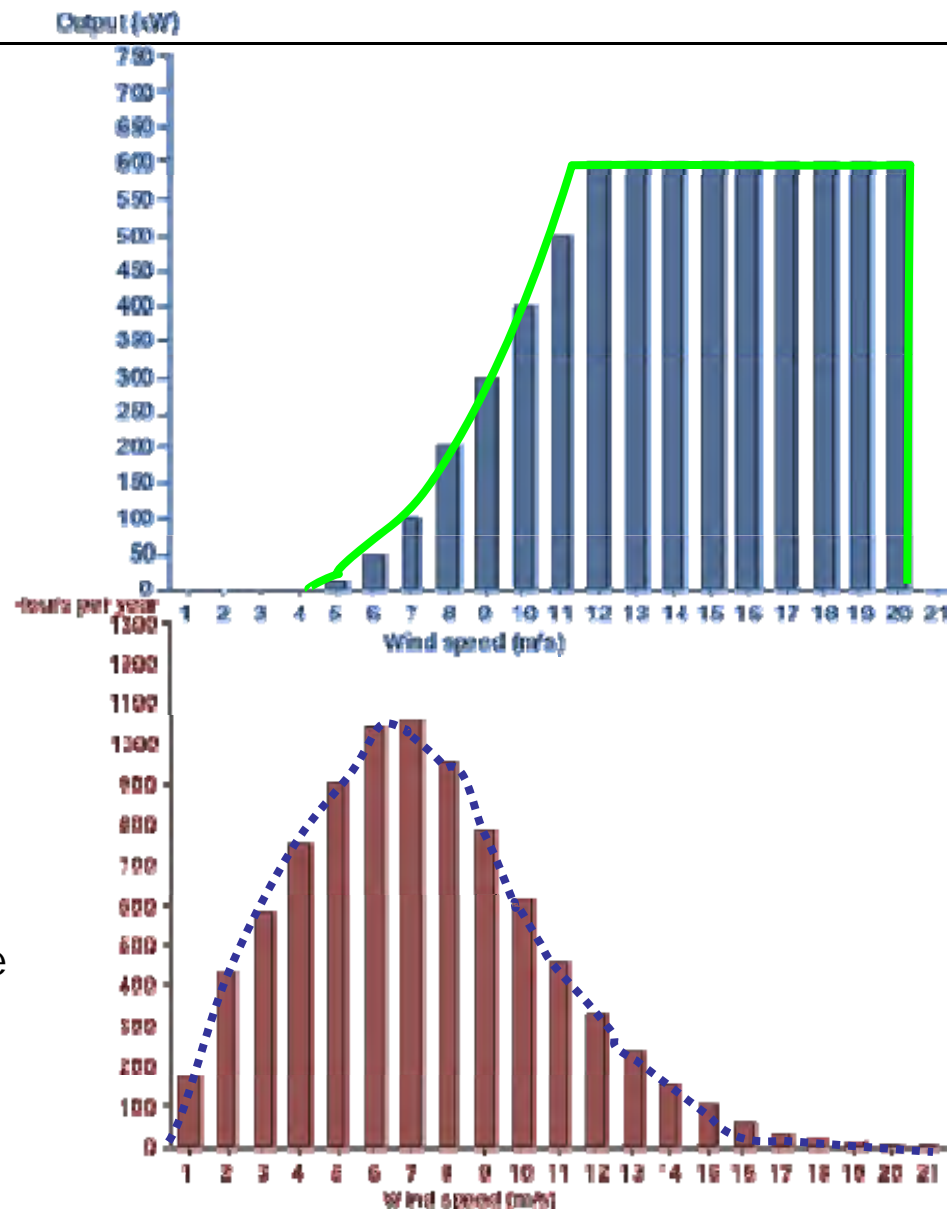


Brzine vjetra mjerene i aproksimirane Rayleigh raspodjelom.

Maksimalna energija ($c_{p,Betz}$) za 100 m promjer lopatica – ukupno 15,4 GWh.

Lee Ranch, Colorado, 2002. from Wikipedia

Procijenjenu proizvodnju el. en. određuje vjerojatnost pojave određene brzine vjetra tijekom godine i karakteristika vjetroagregata (elektrane).



Procjena proizvodnje ukupne godišnje električne energije

$W_{god.}$ – procijenjena godišnja proizvodnja el. en.

$T_{god.} = 365 \cdot 24 = 8760$ h

r – raspoloživost (0,9 ili više)

v_p, v_m – početna i maksimalna brzina vjetra

$P(v)$ – snaga VA pri brzini v

$f(v)$ – funkcija gustoće vjerojatnosti pojavljivanja brzine v

Za utjecaj tlaka i temperature treba uključiti

korekciju c_H i c_T .

Za diskretnu raspodjelu frekvencije brzine

vjetra kroz godinu:

f_i – frekvencija brzine v_i

t_i – trajanje brzine v_i

- broj diskretnih koraka određuje preciznost

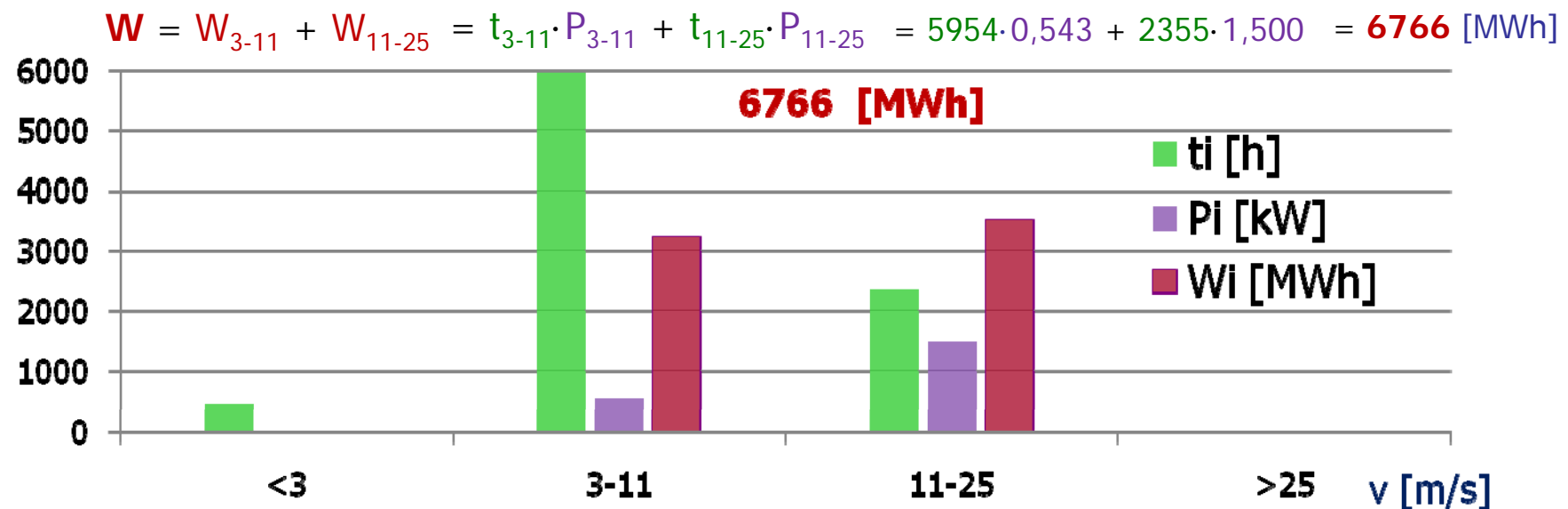
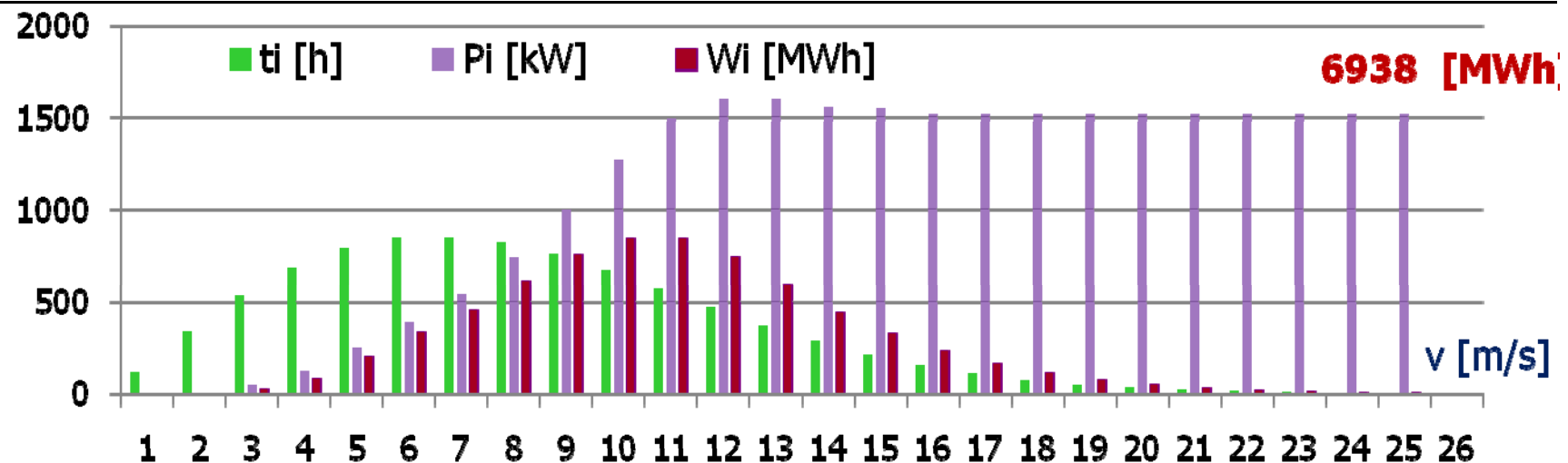
$$W_{god.} = \int_{v_p}^{v_m} T_{god.} \cdot r \cdot P(v) \cdot f(v) \cdot dv$$

$$W_{god.} = 8760 \cdot r \cdot \int_{v_p}^{v_m} P(v) \cdot f(v) \cdot dv$$

$$W_{god.} = 8760 \cdot r \cdot \sum_{v_i=v_p}^{v_m} P_i \cdot f_i$$

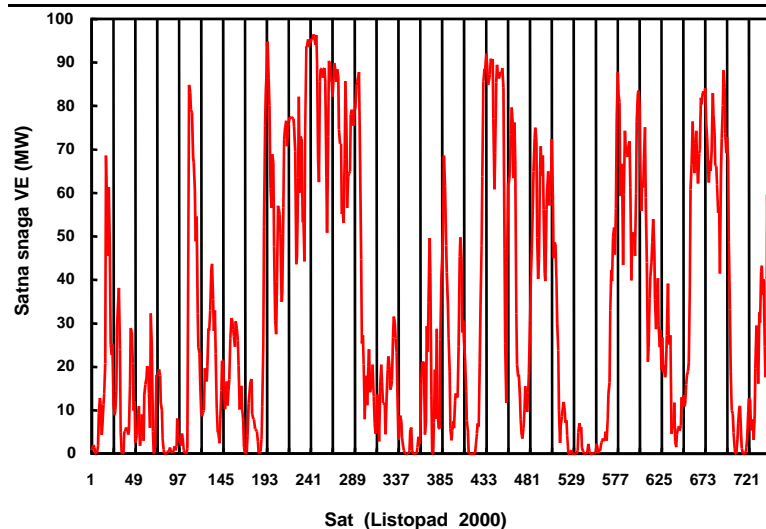
$$W_{god.} = r \cdot \sum_{v_i=v_p}^{v_m} P_i \cdot t_i$$

Procjena proizvodnje ukupne godišnje električne energije - primjer

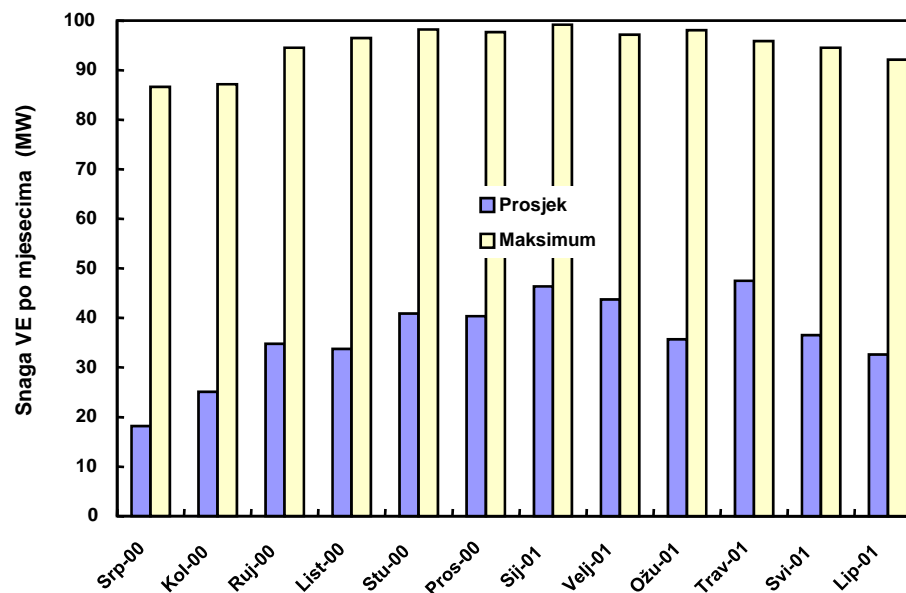
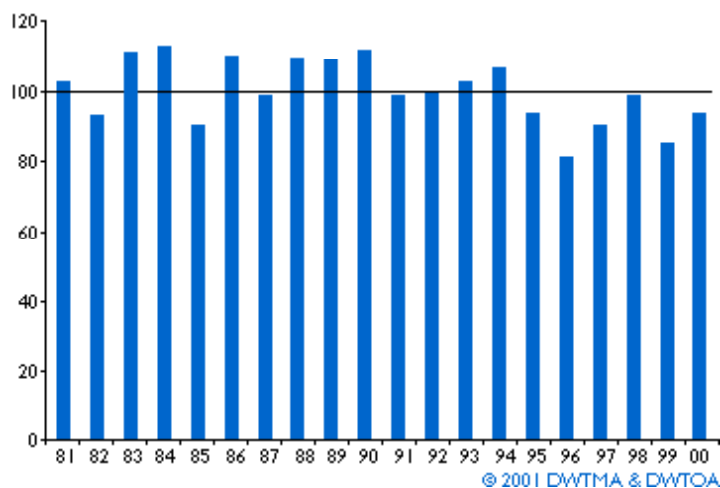
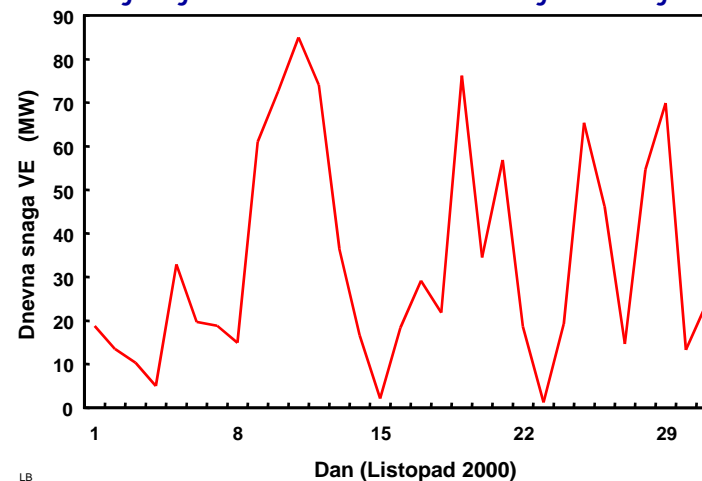


Varijacija proizvodnje vjetroelektrana

Satne, dnevne, sezonske i godišnje varijacije brzine vjetra



Dnevne varijacije veće blizu obale i tijekom ljeta.



Utjecaj VE u EE sistemu

**velika
varijabilnost**

može se dijelom smanjiti
uključivanjem VE na širokom
području

**mala
predvidljivost**

korištenje poboljšanih metoda
predviđanja vremena (= vjetra)

upravljivost

korištenje modernih VE s kontrolom
nagiba lopatica i varijabilnom
brzinom

Zadatak 4.

Proizvedena el. energija iz vjetra

Odrediti proizvedenu el. energiju VA
prema podacima:

početna brzina vjetra $v_p = 4 \text{ m/s}$;

nazivna brzina vjetra $v_n = 10 \text{ m/s}$;

maks. radna brzina vj. $v_{\max} = 25 \text{ m/s}$;

trajanje vjetra između v_p i v_n $t_{p-n} = 3000 \text{ h}$;

trajanje vjetra između v_n i v_{\max} $t_n = 1500 \text{ h}$;

prosječna snaga do nazivne $P_{p-n} = 0,4 \text{ MW}$;

nazivna snaga $P_n = 1 \text{ MW}$;

raspoloživost $r = 90\%$

W

$$W_{\text{god.}} = r \cdot \sum_{v_i=v_p}^{v_m} P_i \cdot t_i$$

Rješenje:

$$\begin{aligned} W &= W_{p-n} + W_n \\ &= r \cdot (P_{p-n} \cdot t_{p-n} + P_n \cdot t_n) \\ &= 0,9 \cdot (0,4 \cdot 3000 + 1 \cdot 1500) \\ &= 0,9 \cdot (1200 + 1500) \\ &= 0,9 \cdot 2700 \\ &= \mathbf{2430 \text{ [MWh]}} \end{aligned}$$

Za vježbu:

Odrediti faktor opterećenja VA.

Rj.: 28 %

Tehnologija: veličine

male

1 ~ 100 kW



Daleka izolirana mjesta
Raznolikost rješenja



srednje i velike

100 ~ 1500 kW



Na mreži
Samostalne i u grupi
1000 kW posve
komercijalne (velike serije)

(pučina)

> 1500 kW



Na pučini (stotine MW)
Razvija se

Mikro	Vrlo male	Male	Srednje	Velike
1	10	100	750	[kW]

Tehnologija: osnovne komponente



HAWT

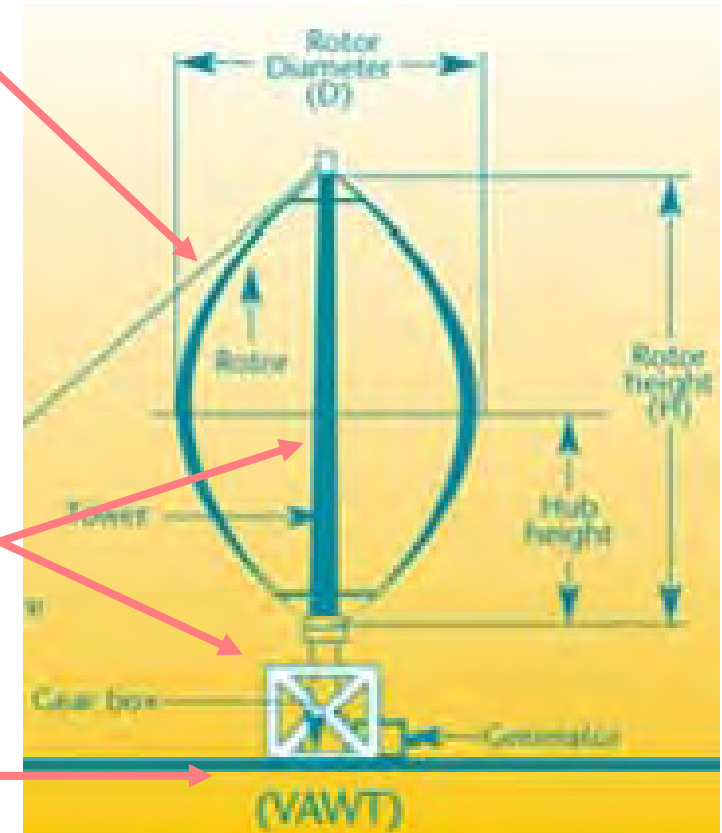
Lopaticice rotora

pozicioniranje
(prijenos)
generator
kontrola

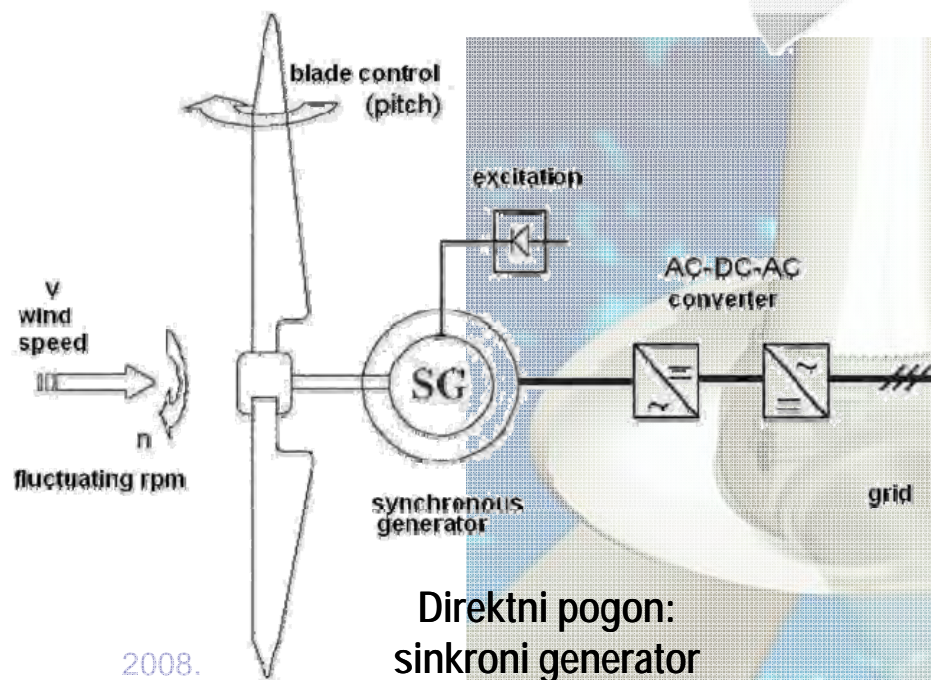
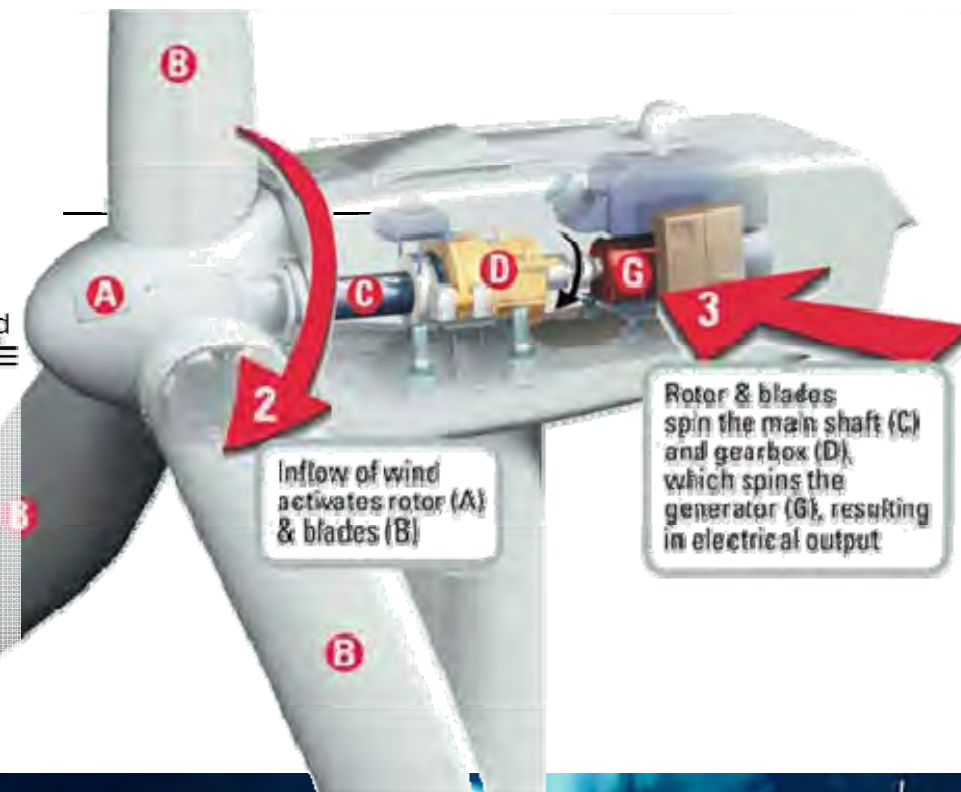
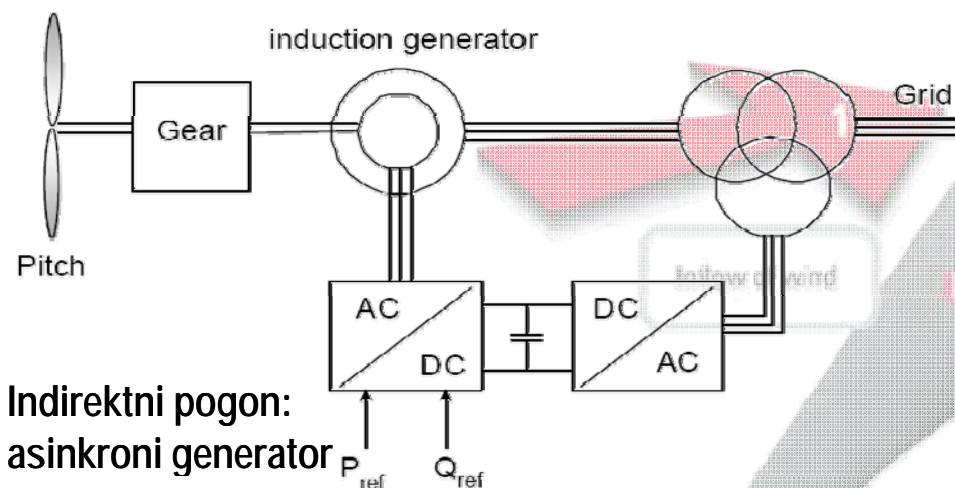
kućište

toranj

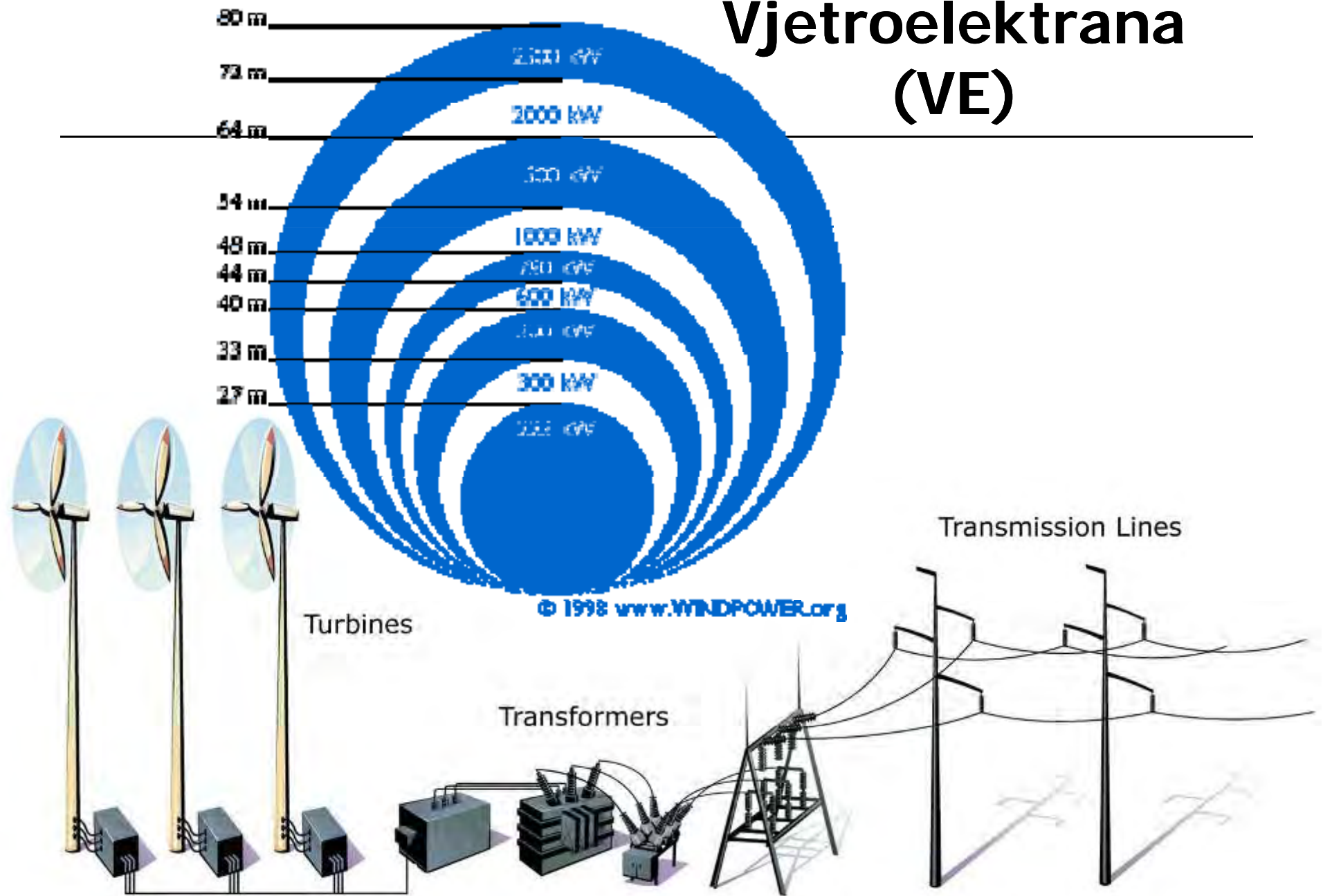
temelji



Lopatice, prijenos, generator i kontrola

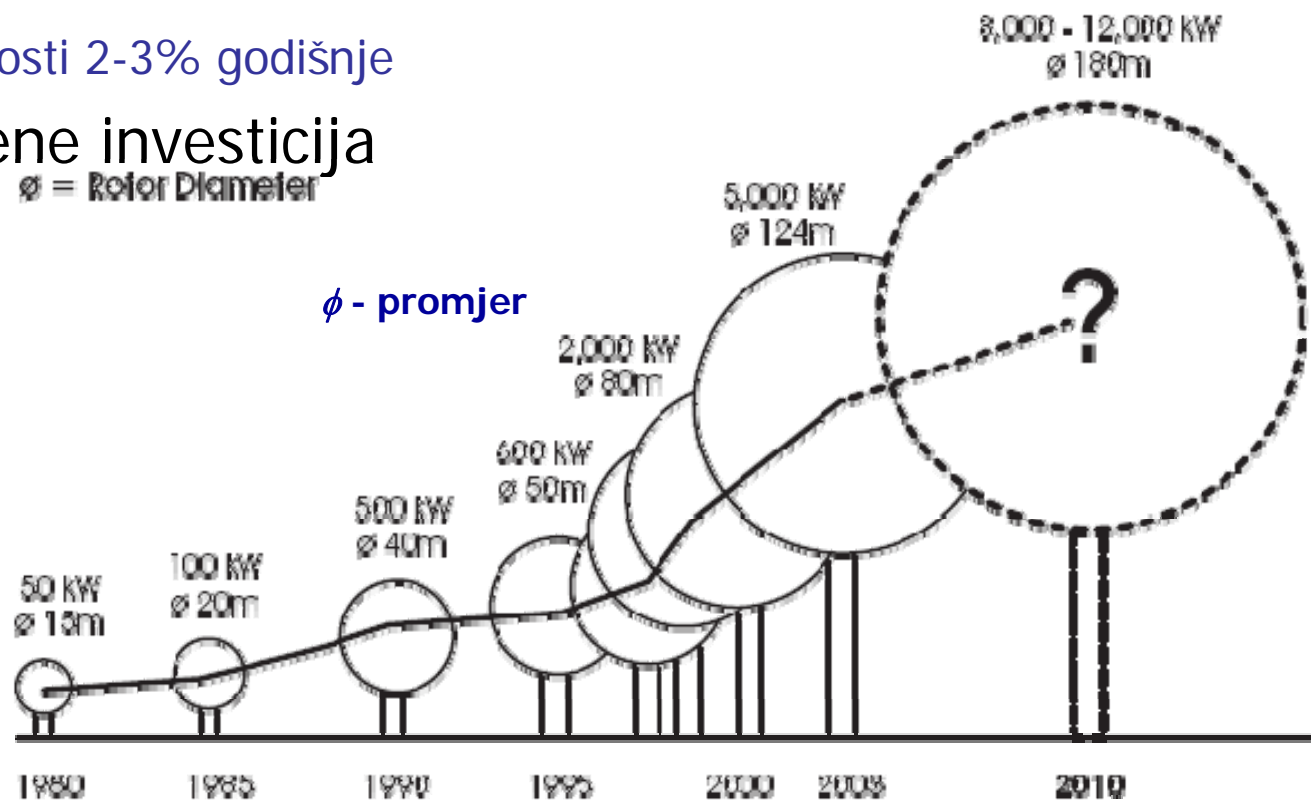


Vjetroelektrana (VE)

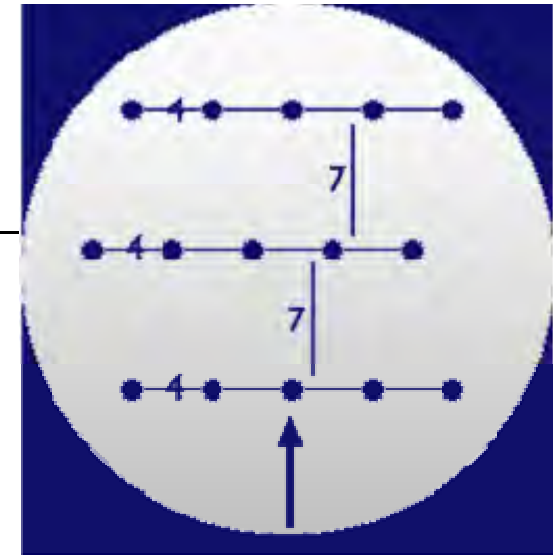
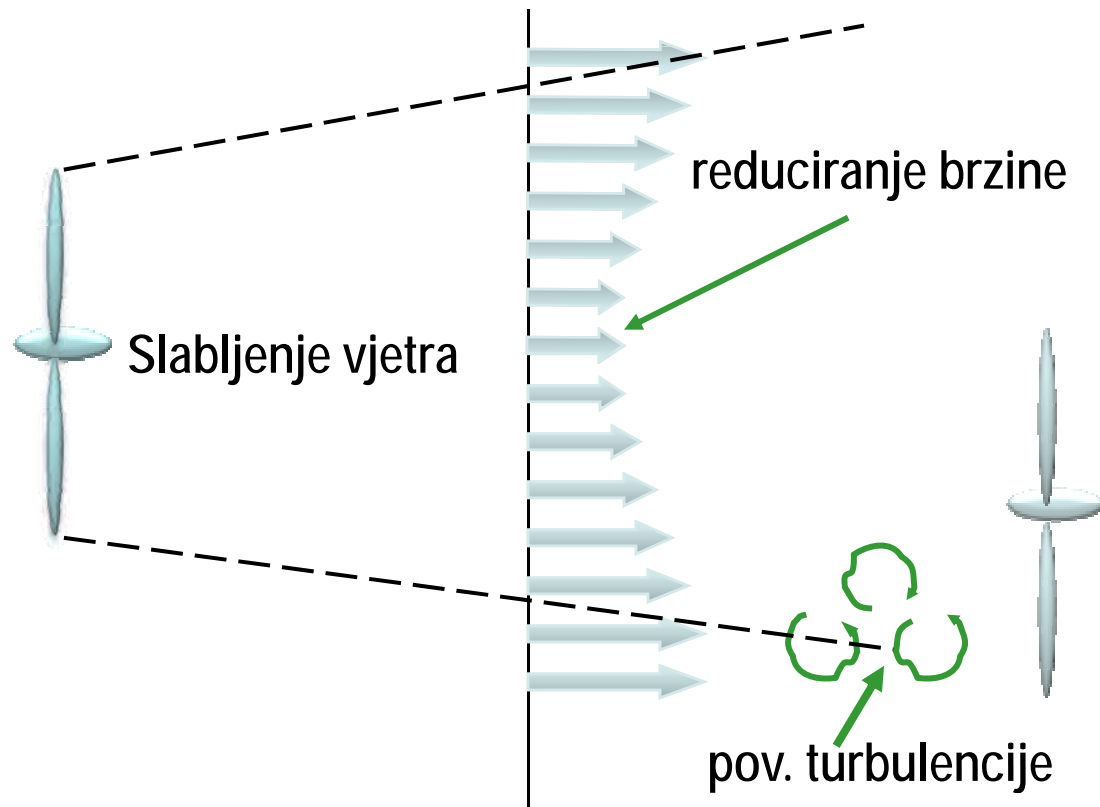


Trendovi

- Jedinice od 2 MW i više sve važnije od 2002.
- Poboljšana efikasnost
 - Odabir lokacije
 - Bolja oprema
 - Porast efikasnosti 2-3% godišnje
- Stalni pad cijene investicija



Lokacije VE: efekt više VA u blizini



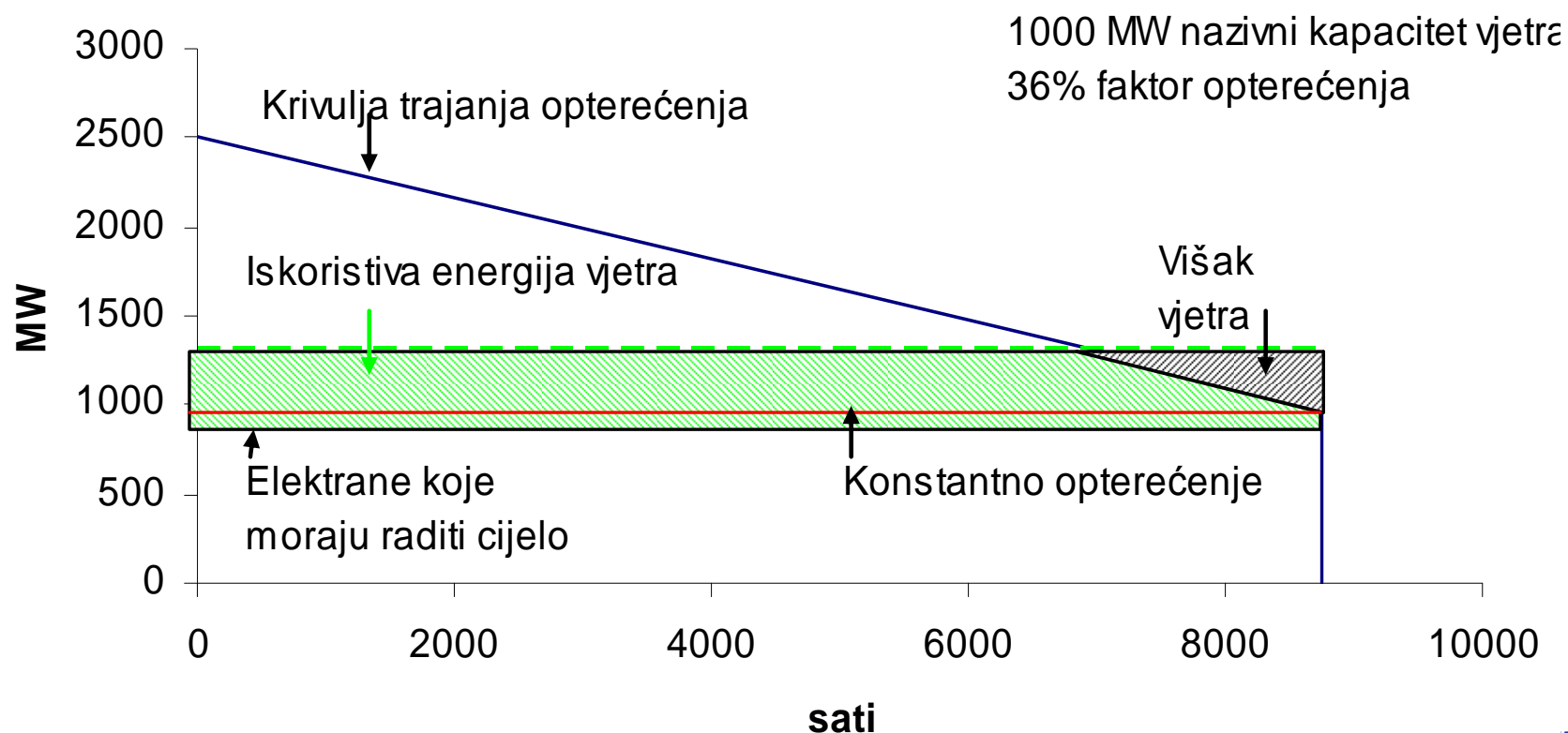
turbine niz vjetar:

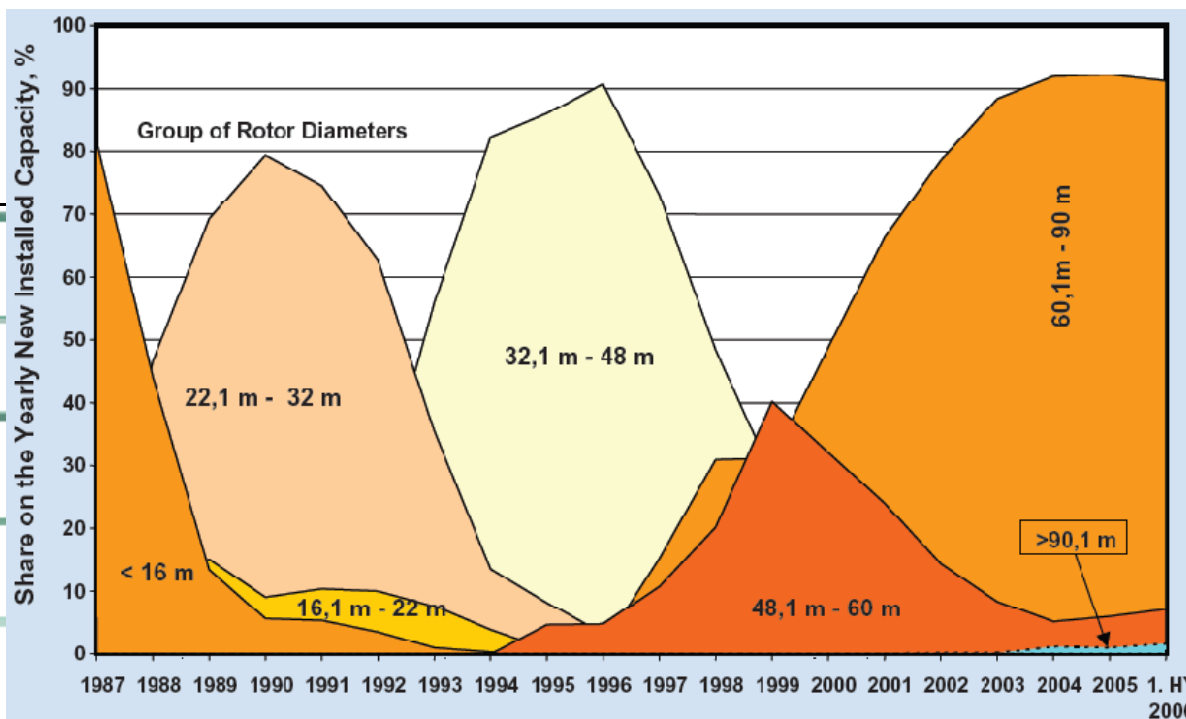
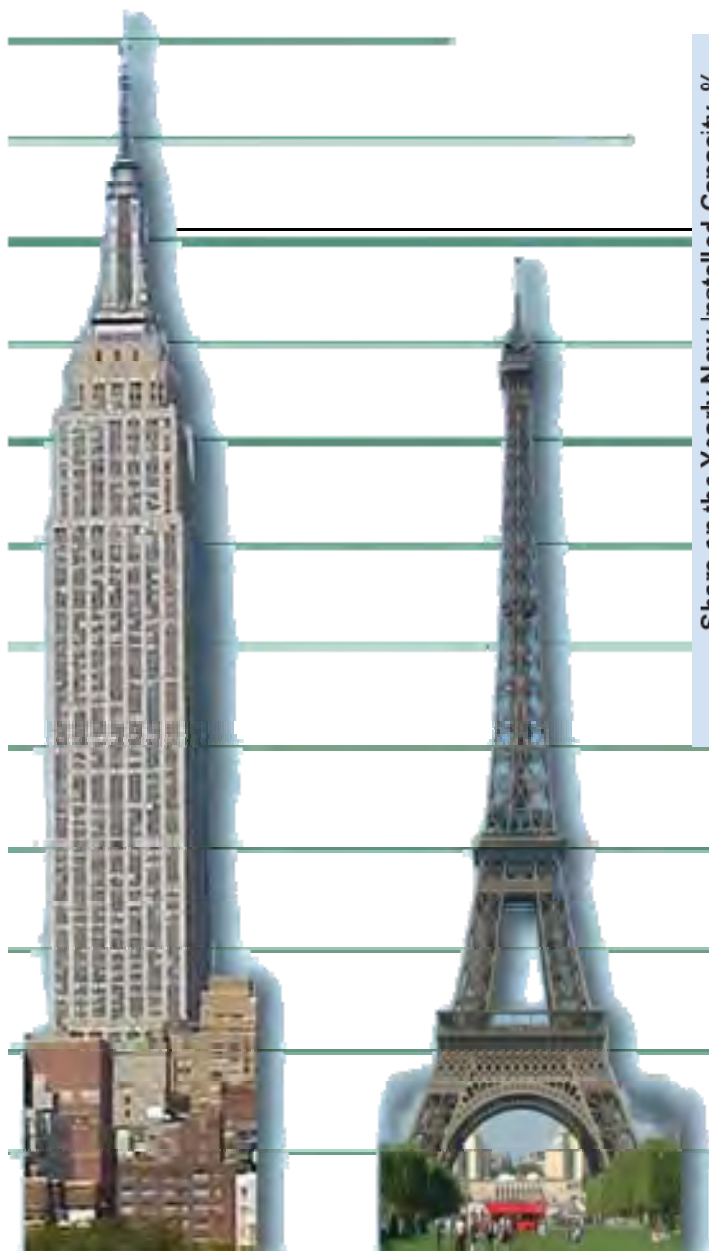
- manje brzine: manje snage
- veće turbulencije: više opterećenja
- veći broj VA u VE povećava gubitke

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

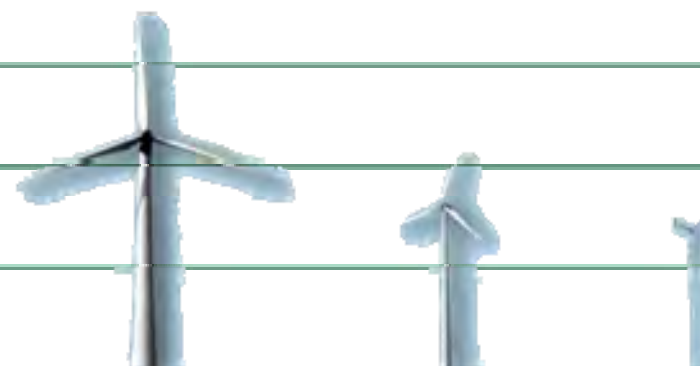
Priključak na mrežu i višak vjetra

- Odbacivanje energije iz vjetroelektrana za snagu koja prelazi opterećenje minus bazna proizvodnja
- Provodi se na nivou regionalne interkonekcije
- Promjenjivo za sve periode





33 m



Empire
State
381 m

Eiffel
Tower
301 m



FER
C zgrada

1.5 MW
VA
109 m

250 kW
VA
65 m

100 kW
VA
43 m

Ukratko

- Iskoristiva snaga i energija vjetra ograničena je teorijski i praktično
- Pokraj velike brzine važna stalnost i pristup el. en. mreži
- Predviđanje brzine vjetra važno za planiranje
- Vjetar isplativ na najboljim lokacijama
- Za korištenje važna politika, planiranje i financiranje

