

Ctt



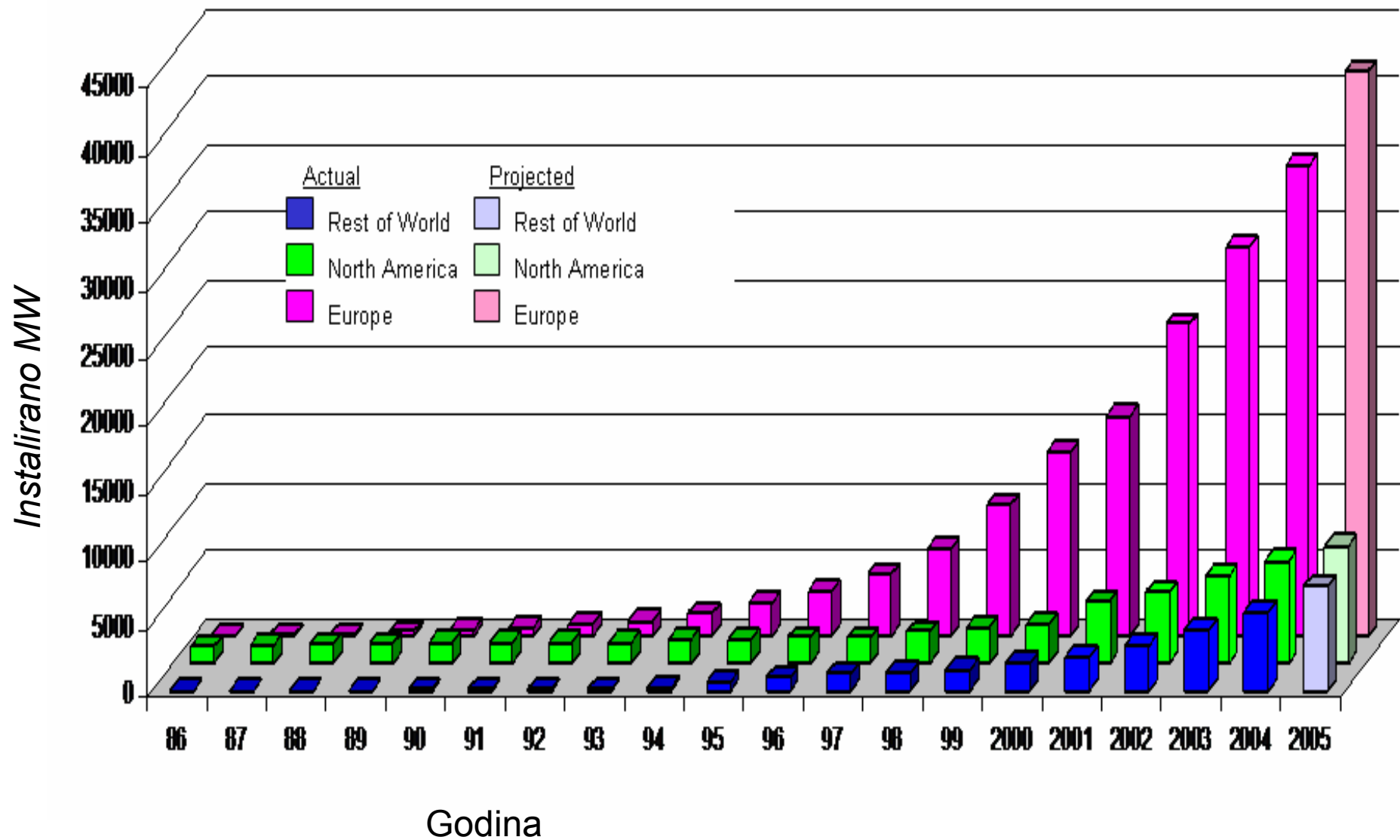
ENERGIJA VJETRA

Stanje tehnologija za korištenje energije vjetra

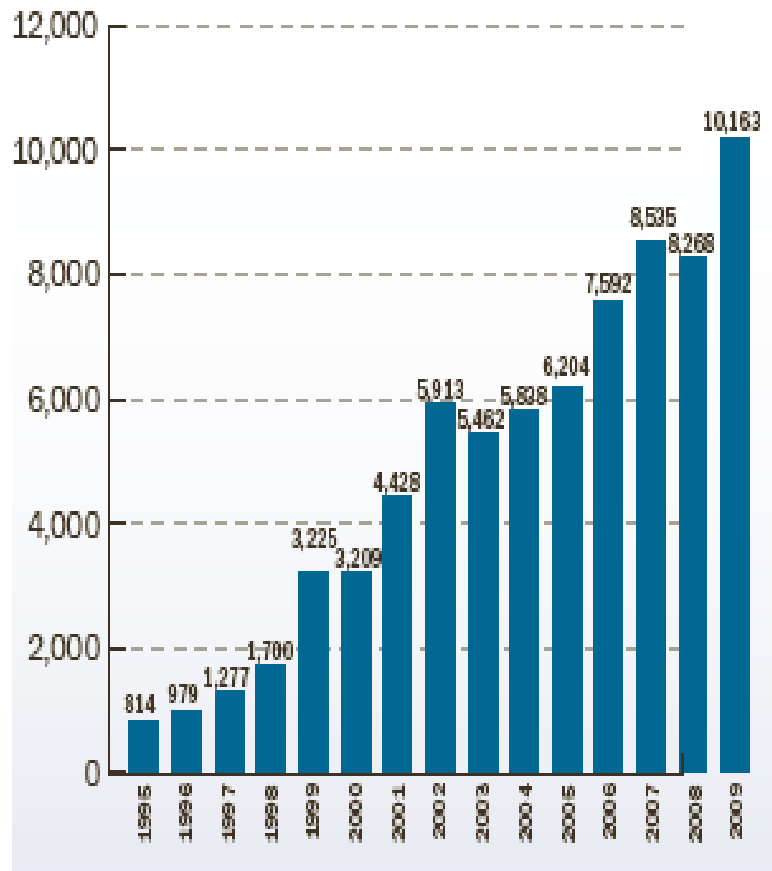
Prof. dr.sc. Branimir Matijašević

Zagreb, 19.02.2010.

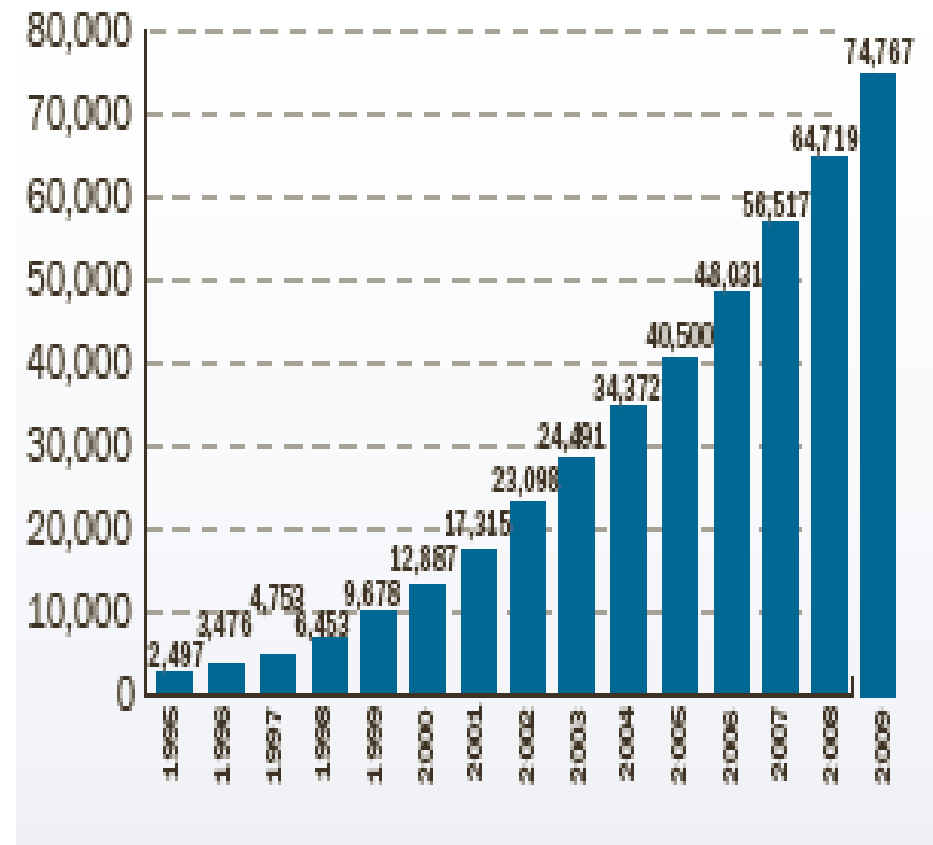
Porast korištenja energije vjetra



Korištenje energije vjetra u EU

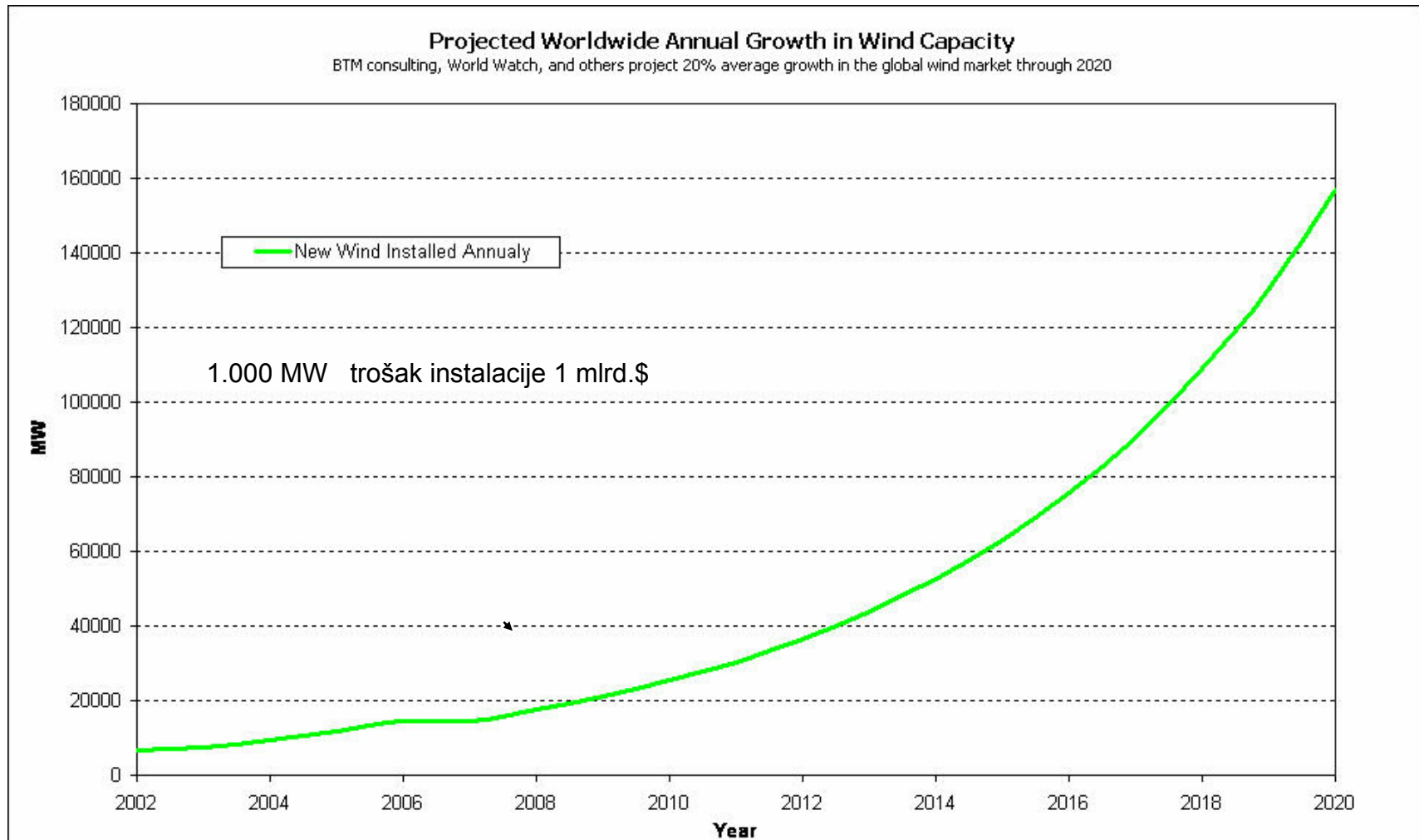


Godišnje instaliranje snaga u EU u MW



Kumulativno instalirana snaga u MW

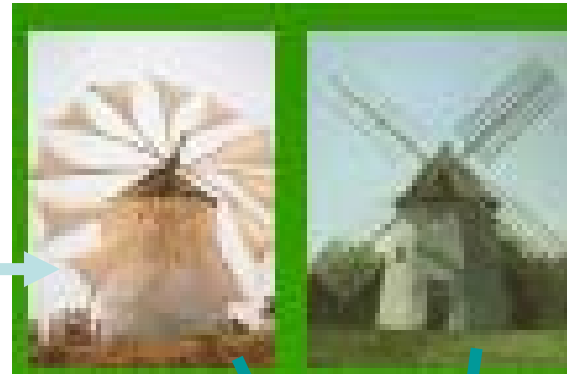
Predviđanje godišnjeg porasta kapaciteta vjetroelektrana



Vjetromlinovi i vjetroturbine

- Najranije korištenje energije vjetra je bilo za potrebe:

mljevenja



za potrebe napajanja vodom

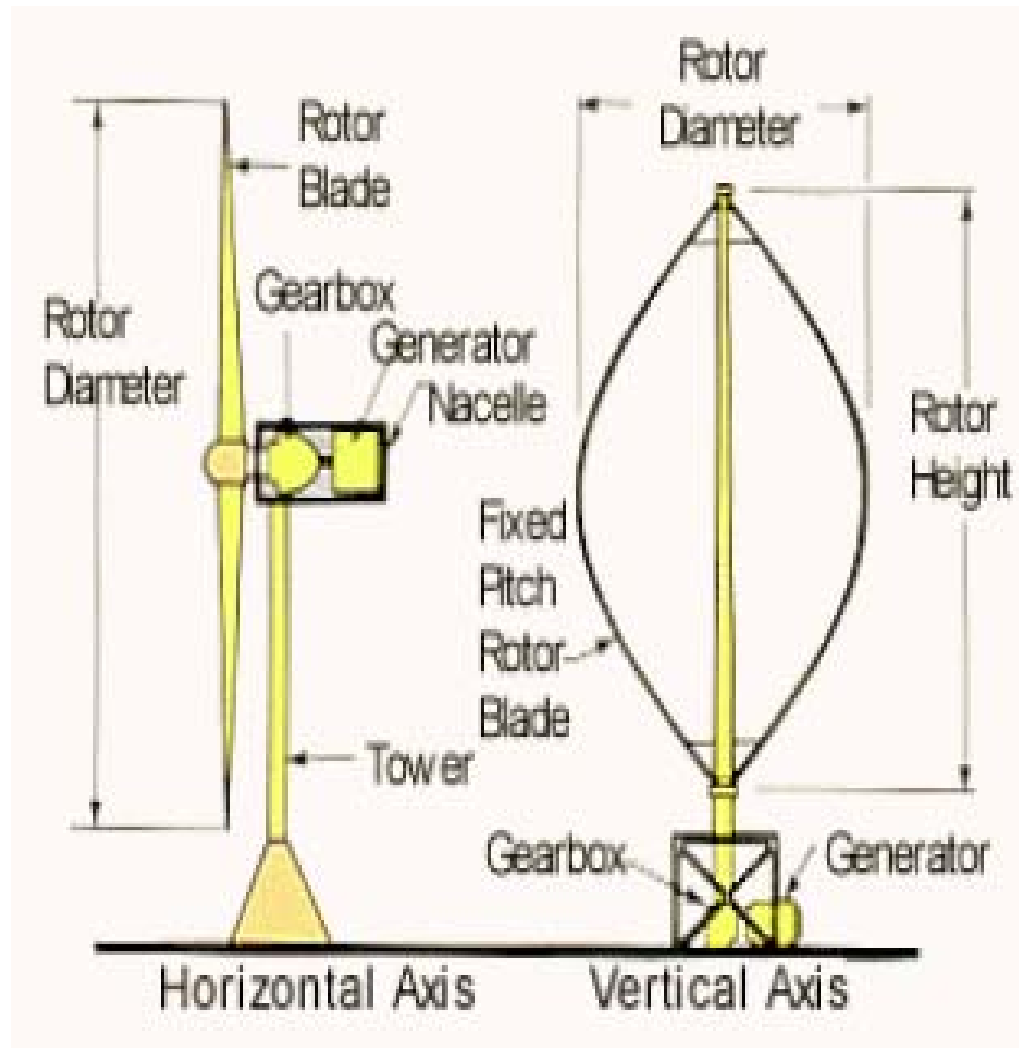


- Za proizvodnju električne energije koriste se sustavi za konverziju energije vjetra (SKEV)



Komponente SKEV-a

- Temelj
- Toranj
- Rotor turbine
- Reduktor
- Generator
- Upravljanje

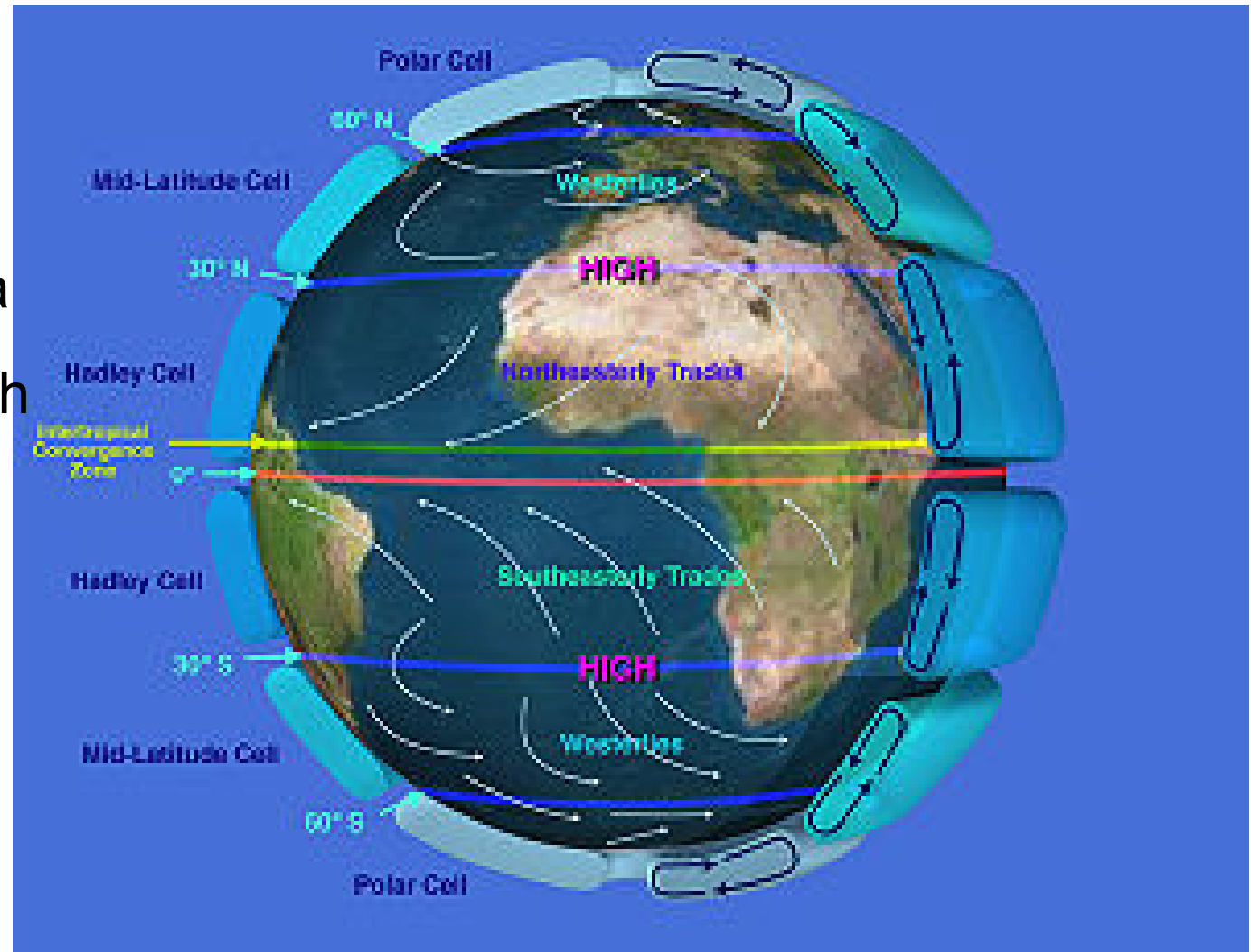


Globalni vjetrovi

- Sunčevo zagrijavanje površine zemlje uzrokuje područja viših i nižih tlakova

- Oblici cirkulacionih ćelija:

- Hadleyove ćelije- područje ekvatora
- Ferrellove ćelije- područje srednjih geografskih širina
- Polarne ćelije

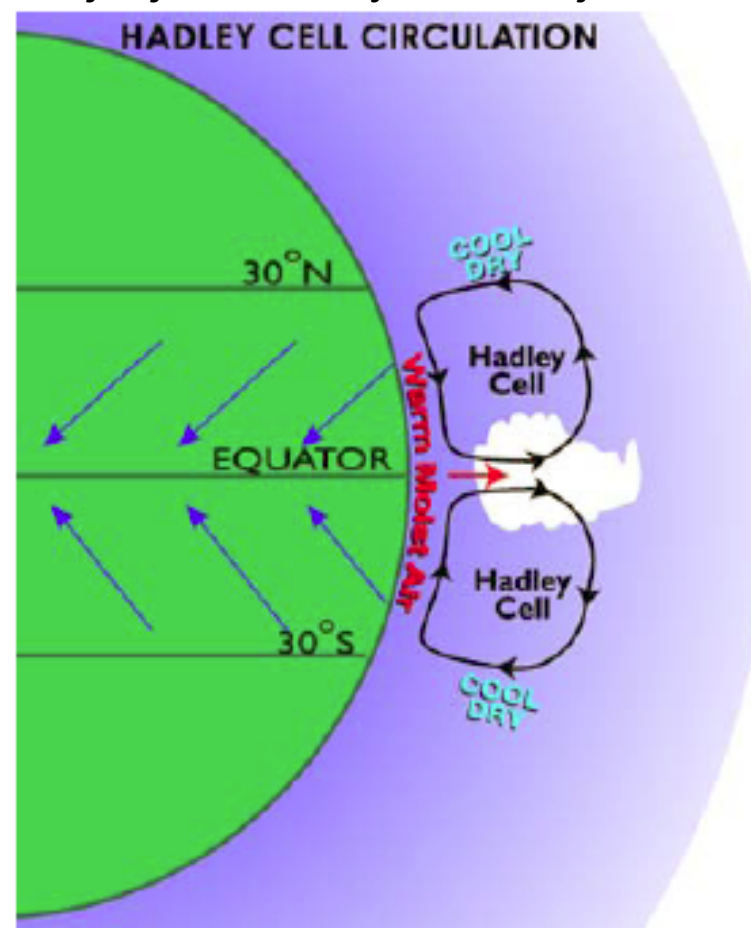


Primjer Hadleyevog strujanja

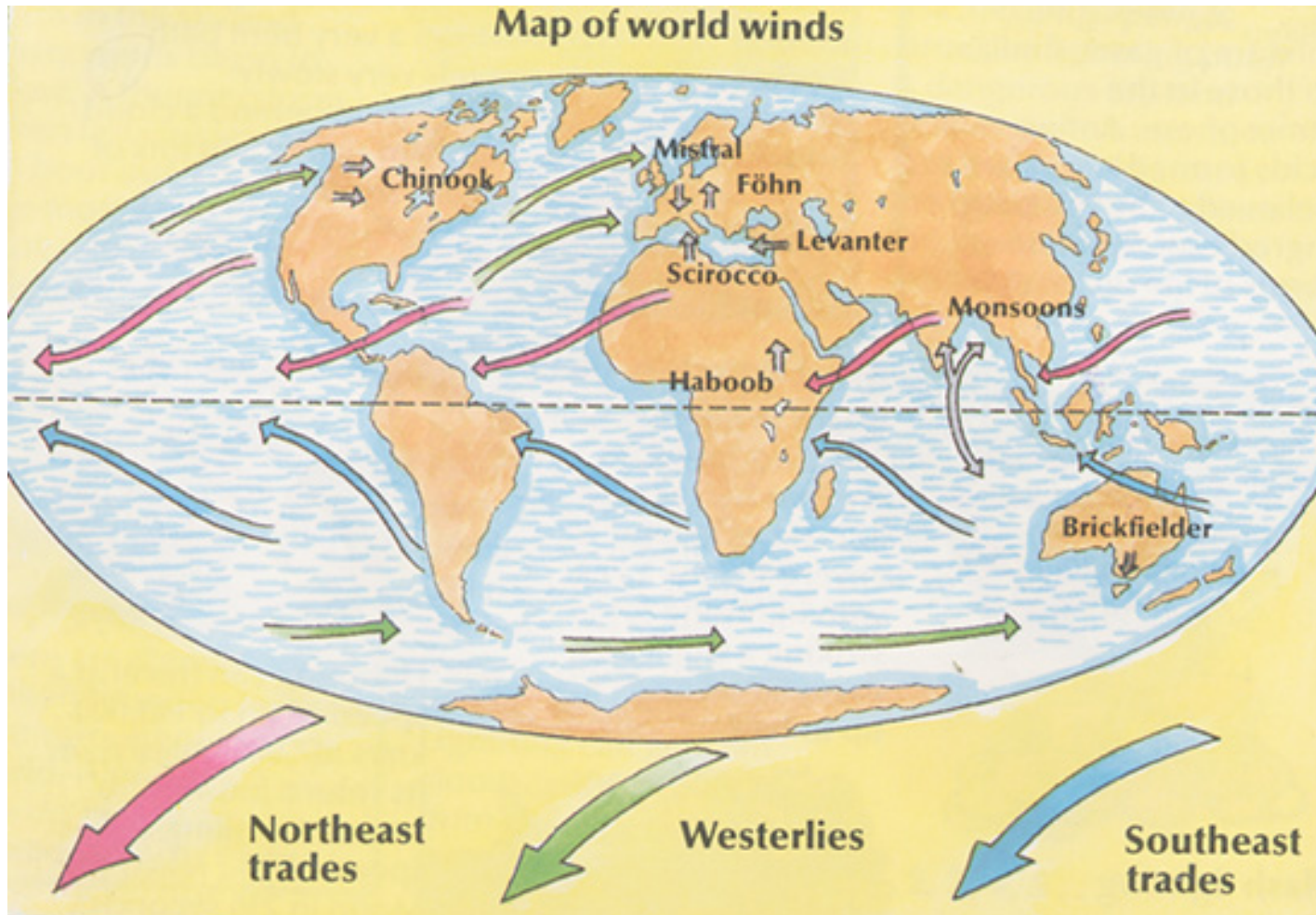
Hadleyev vjetar je strujanje u atmosferi koje prouzrokuje istočne tropske vjetrove:

- Zrak se diže u atmosferu u blizini ekvatora zbog jačeg sunčevog zagrijavanja površine.
- Putuje prema polovima iznad površine zemlje.
- Vraća se ohlađen na površinu zemlje u subtropskom području.
- Struji prema ekvatoru po površini zemlje.
- Zajedno s rotacijom zemlje uzrokuje sjeveroistočne i jugoistočne vjetrove.

Strujanje u Hadleyevim ćelijama



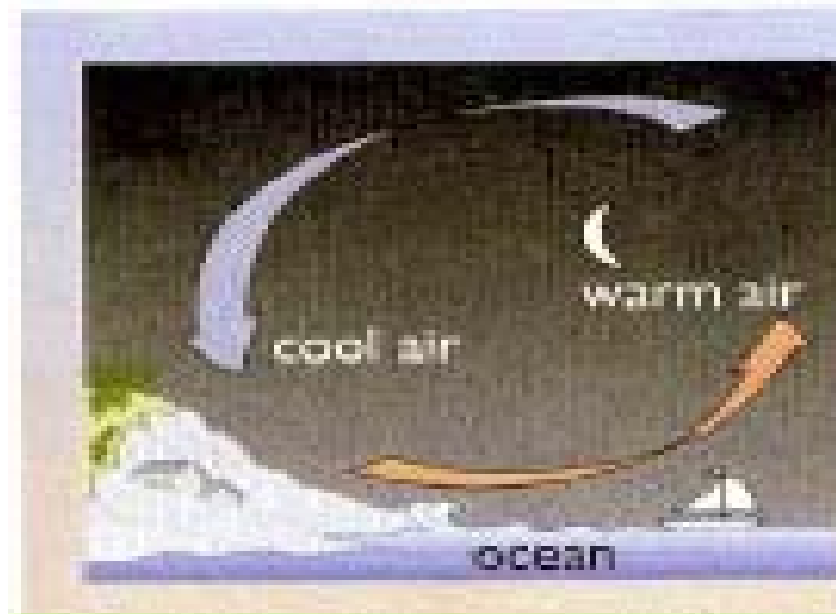
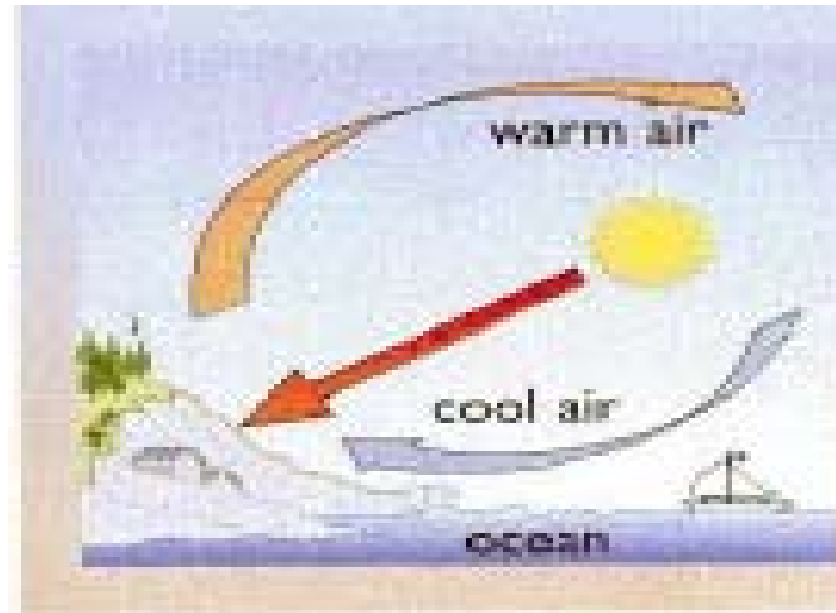
Svjetska karta globalnih vjetrova



Lokalni vjetrovi- vjetrovi u priobalju

Dnevni morski vjetrovi:

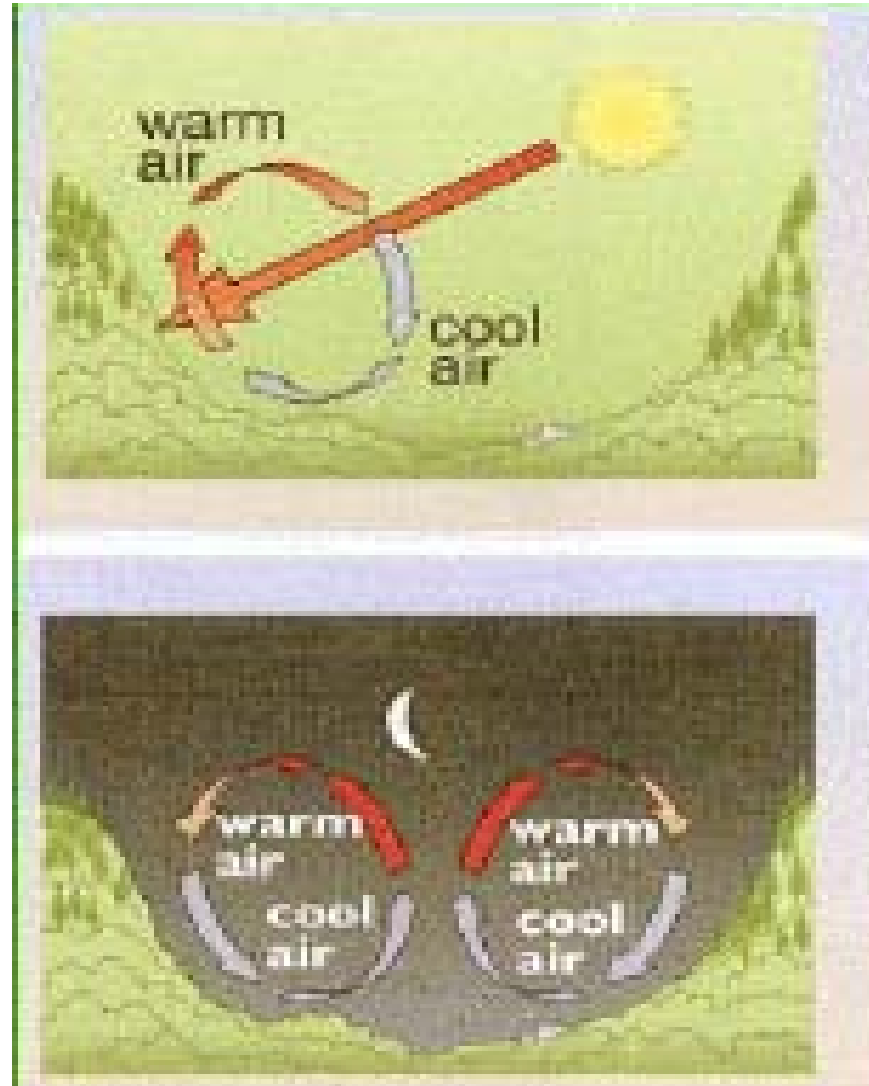
- Nastaju zbog većeg toplinskog kapaciteta mora.
- Po danu se tlo brže zagrijava od mora.
- Po noći se tlo brže hladi od mora.



Lokalni planinski vjetrovi

Proces formiranja dnevnih planinskih vjetrova:

- Cirkulacija zraka danju
- Cirkulacija zraka noći



Karakter vjetrova u priobalju

Beaufortova ljestvica jačine vjetra				Broj dana u godini s vjetrom jačim od 6 i 8 Beauforta			
Beaufortov stupanj	Brzina m/s	Brzina km/h	čv	Opis vjetra	Meteorološka postaja	Srednji broj dana s vjetrom > 6	Srednji broj dana s vjetrom > 8
0	0-1	0-1	0-1	Tišina	Rovinj	4.4	0.4
1	2	2-5	2-3	Lahor	Poreč	12.9	1.0
2	3-4	6-11	4-6	Povjetarac	Pula	44.3	11.5
3	5-6	12-19	7-10	Slab vjetar	Rijeka	40.5	10.8
4	7-8	20-28	11-15	Umjeren vjetar	Krk	40.8	3.3
5	9-11	29-38	16-21	Umjereno jak vjetar	Mali Lošinj	13.4	1.0
6	12-14	39-49	22-27	Jak vjetar	Rab	63.2	26.6
7	15-17	50-61	28-33	Vrlo jak vjetar	Senj	143.9	48.8
8	18-21	62-74	34-40	Olujni vjetar	Zadar	39.1	0.6
9	22-24	75-88	41-47	Oluja	Šibenik	123.9	33.3
10	25-28	89-102	48-55	Žestoka oluja	Komiža	13	1.2
11	29-32	103-117	56-63	Orkanska oluja	Split	106.7	21.9
12	>32	>118	>63	Orkan	Kaštela	11.9	0.7
					Hvar	28.0	2.4
					Makarska	37.4	8.8
					Korčula	28.2	6.3
					Lastovo	83.5	10.0
					Dubrovnik	98.1	23.7

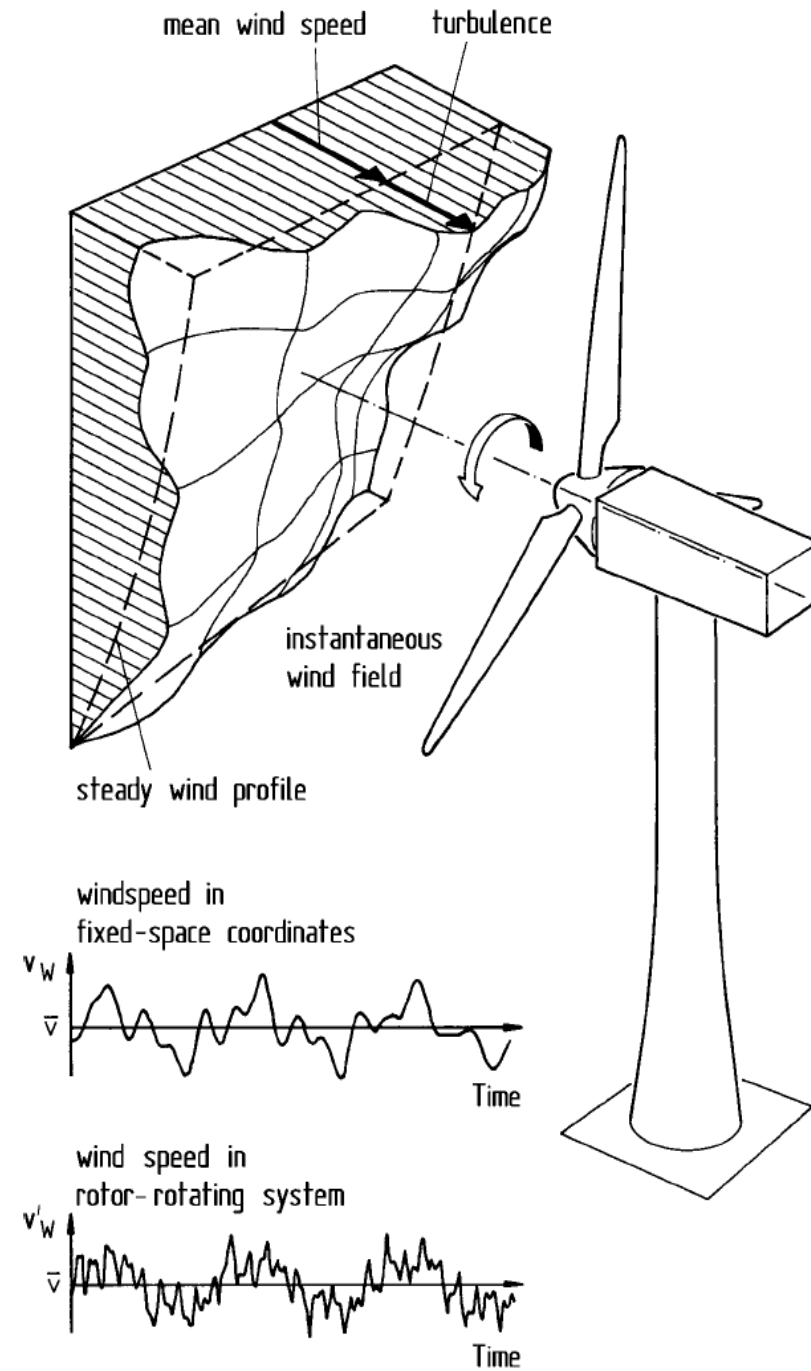
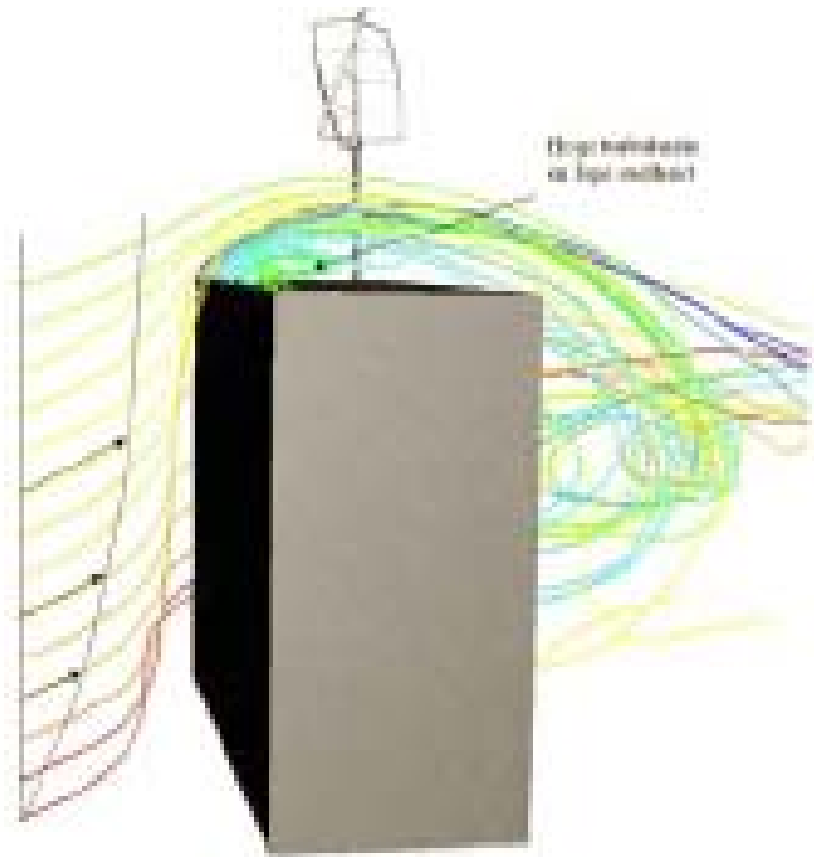
Sezonski vjetrovi na Jadranu

- **Bura**
 - hladan jak i izrazito mahovit vjetar – nastaje kada se hladan zrak gomila na jednoj strani planine, prebacuje se preko nje i strmo spušta niz obronke. U našem priobalju se javlja tokom kasne jeseni zime i ranog proljeća.
- **Jugo:**
 - ciklonalni vjetar kao posljedica sredozemne ciklone
 - anticiklonalni vjetar kada je na jugu anticiklona (visok tlak) a na sjeveru ciklona (nizak tlak)
- **Maestral:**
 - dnevni vjetar tipičan za ljetno razdoblje

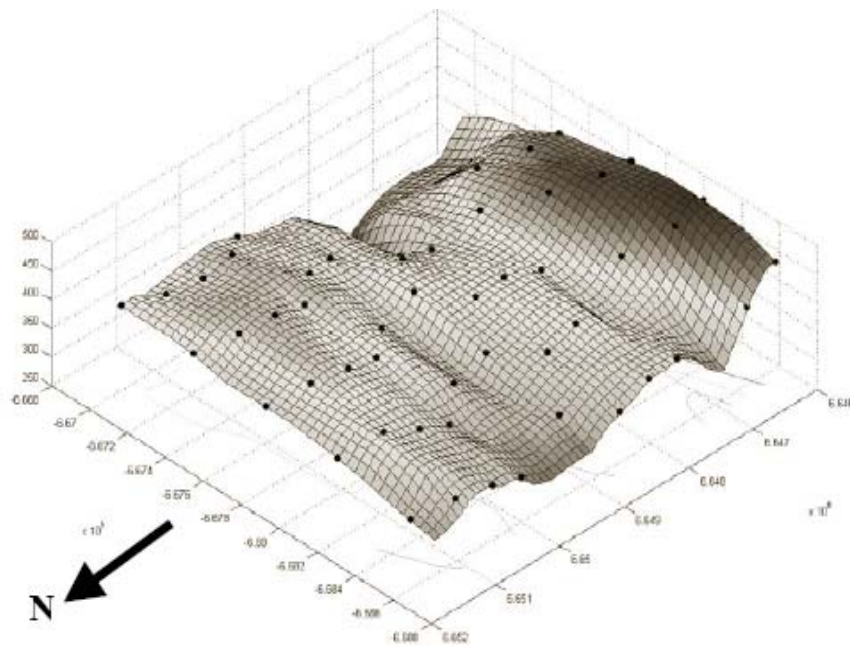
Koji su osnovni inženjerski problemi pri korištenja vjetra

- Energetske karakteristike stroja: koliko snage ?
 - Pretvorba energije vjetra
 - Radne karakteristike vjetroturbina
 - Mehanička zaštita ili: *Hoće li se slomiti?*
- Dinamika vjetra: Koliko energije?
 - Vremenske karakteristike brzine vjetra
 - Dnevne, mjesečne, sezonske, godišnje karakteristike vjetra.
- Prostorne karakteristike vjetra:
 - Visina stupa.
 - Lokalne karakteristike poremećaja, prepreka.
- Raspored vjetroatregata u vjetroeletani farmi.

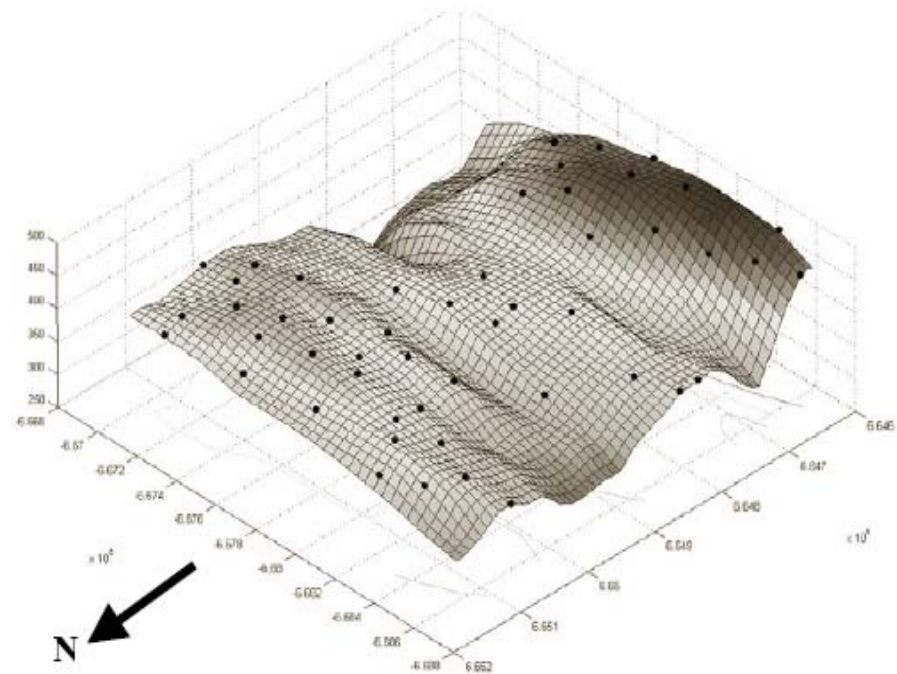
Prostorne karakteristike vjetra



Rezultati optimizacije rasporeda vjetroturbina



Intuitivni raspored



Raspored nakon optimizacije programom AMPL-CPLEX rješavačem.

Energija vjetra i snaga

- Kinetička energija konačne mase zraka = $0.5 \cdot m \cdot V^2$

- m = masa zraka (kg) u kontrolnom volumenu
- V = brzina vjetra (m/s)
- Energija (Joul) = kgm^2/s^2

- Snaga (Wat) = energija (Joul)/vrijeme

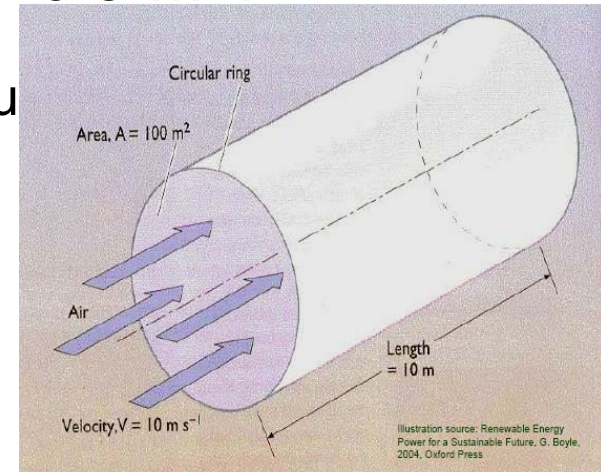
- Masa zraka koja kroz područje djelovanja prolazi u sekundi:

- $m = \rho AV$

- A = poprečni presjek kontrolnog volumena

- ρ = gustoća zraka u kontrolnom volumenu

- Snaga zraka koji struji kroz presjek = $0.5\rho AV^3$

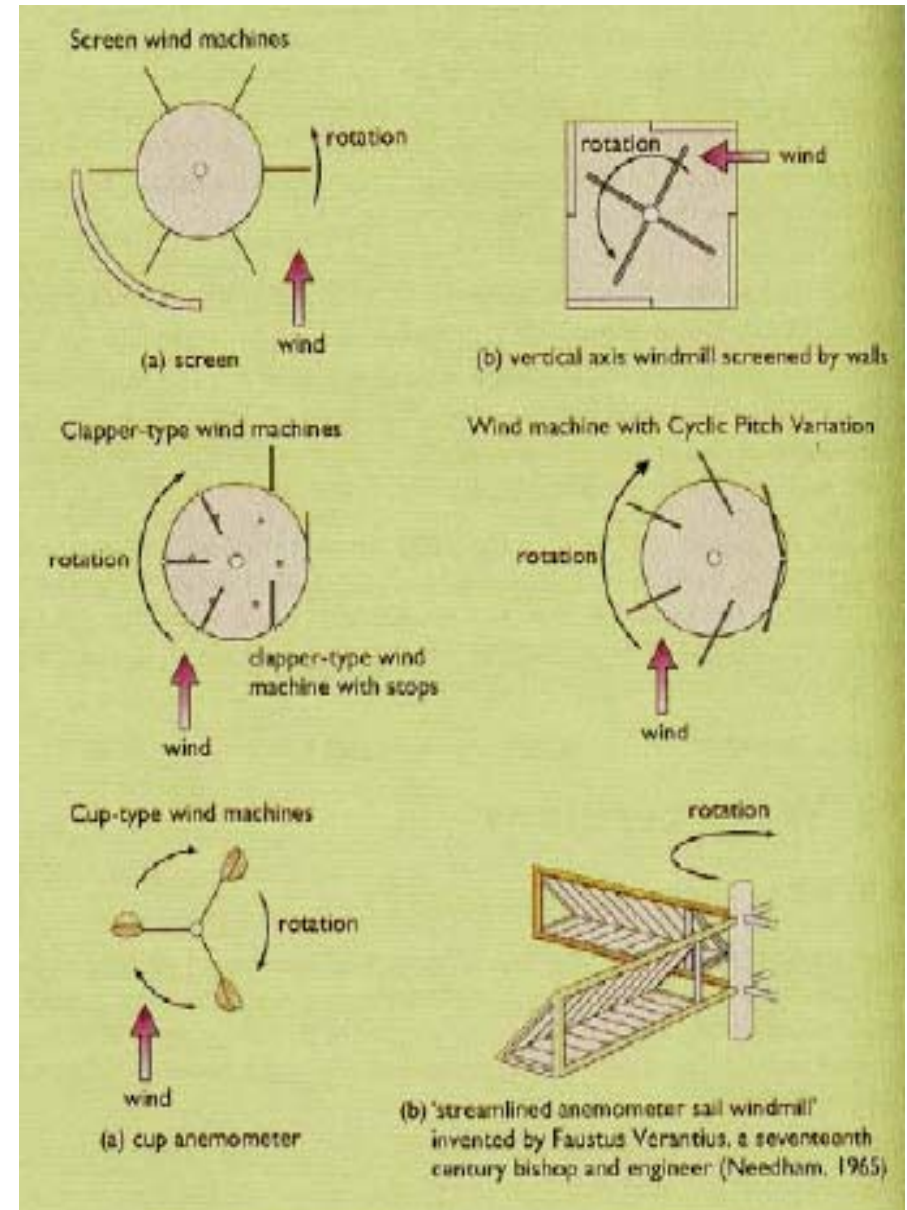


Efikasnost energetske pretvorbe

- Samo dio raspoložive energije vjetra moguće je pretvoriti u mehanički rad a zatim u električnu energiju.
- Maksimalna teoretske moguća efikasnost pretvorba energije vjetra u mehanički rad:
 - Prema Betzovom ograničenju $=0.59$ - Vjetra na izlazu se ne može usporiti na nulu.
 - Od energije vjetra moguće je maksimalno dobiti mehaničke snage
$$0.59 \cdot 0.5 \rho A V^3$$
- Ostali gubici:
 - Zbog zapuha vjetra okolo a ne kroz aktualni presjek (vremenski promjenjiv intenzitet).
 - Aerodinamski otpor.
 - Gubici trenja na radnim površinama / vrtlozi i turbulencije.

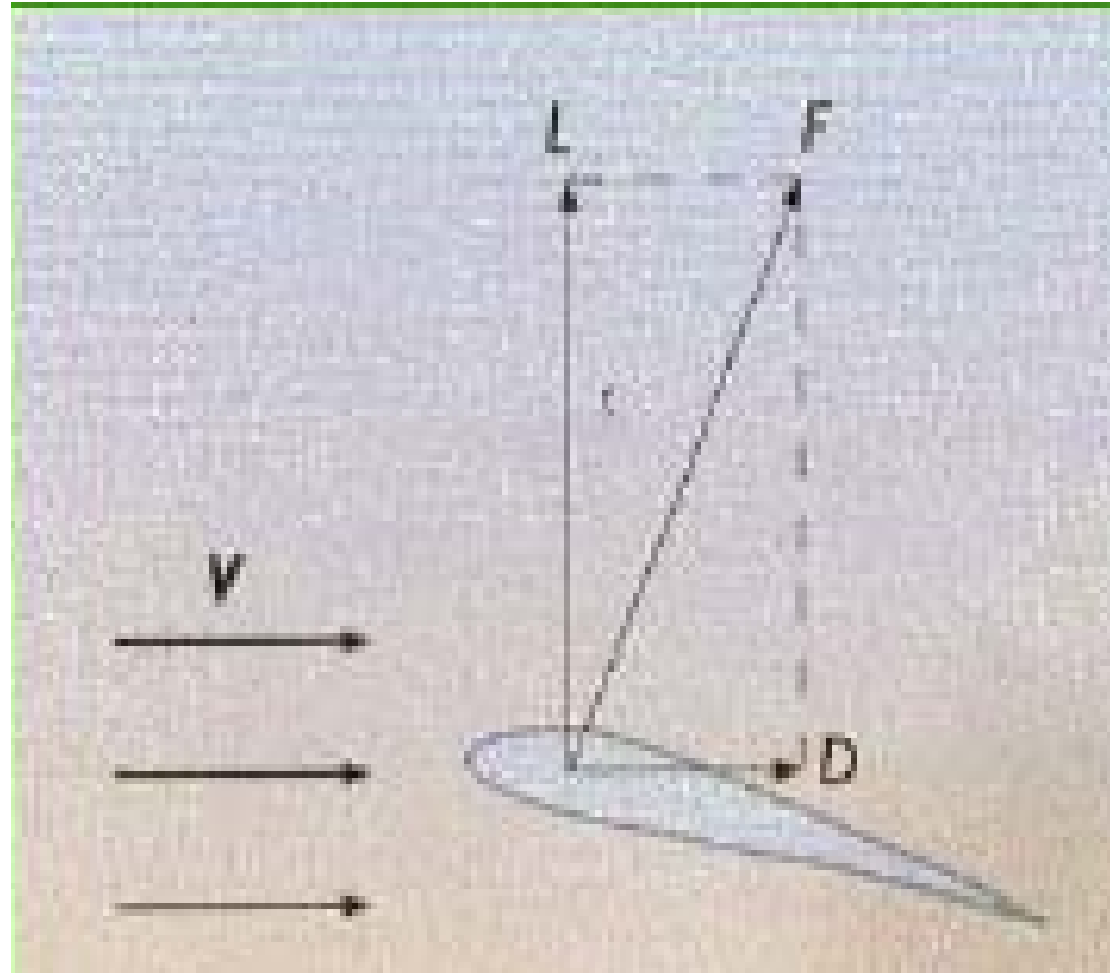
Ranija rješenja

- Prva “vjetroturbina” je evidentirana prije 4000 godina.
- Agregati su radili na principu razlike otpora.
- Izvedbe su bile s vertikalnom osi vrtnje.
- Lopatice se ne mogu kretati brže od vjetra.
- Različiti tipovi:
 - oklopljene
 - čegrtaljke
 - jedra
 - šalice



Moderni strojevi – vjetroturbine uzgonskog tipa

- Moment se ostvaruje komponentom sile uzgona L okomite na smjer vjetra.
- Sila otpora D je komponentu u smjeru vjetra.

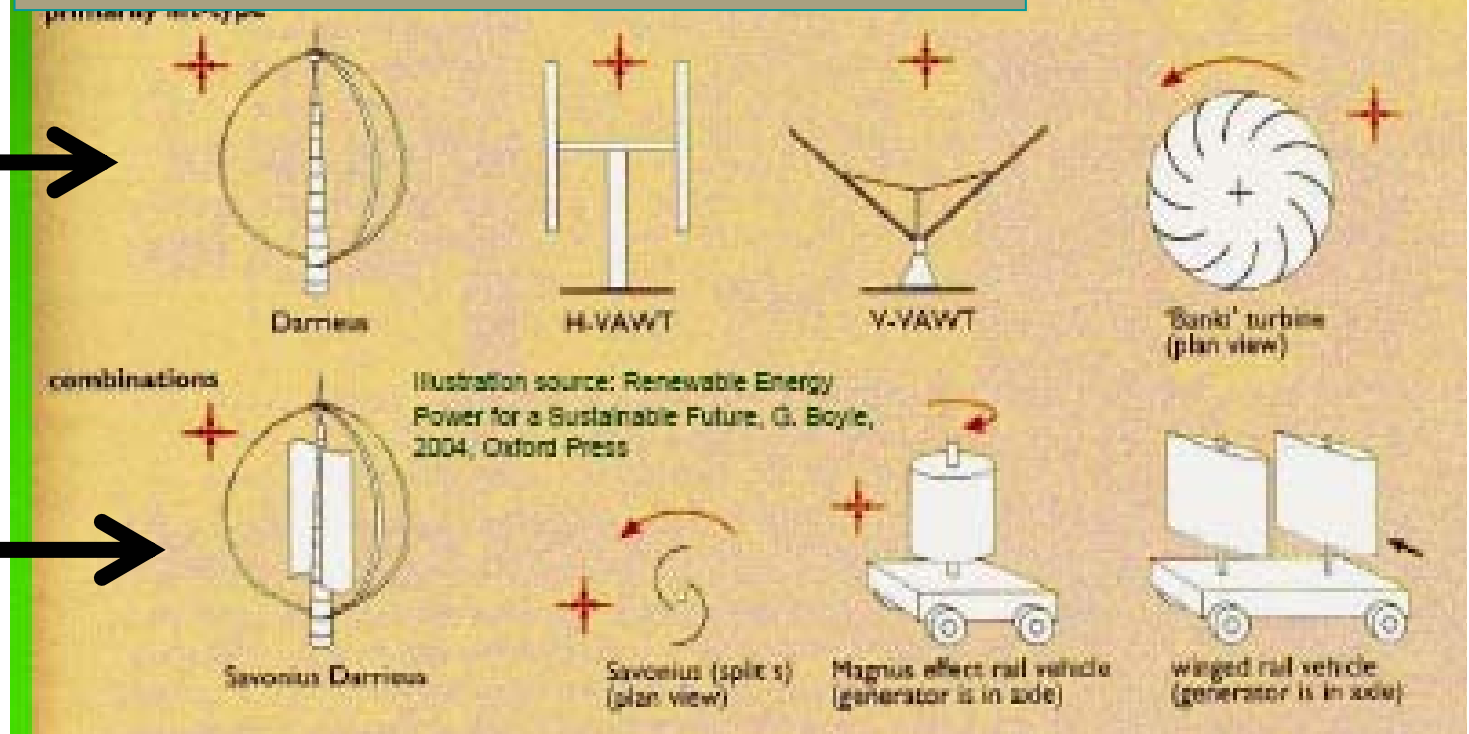


Vjetroturbine s vertikalnom osi vrtnje

Različiti tipovi vjetroturbina s vertikalnom osi



Prvenstveno rade na principu uzgona



Kombiniran princip uzgona i otpora

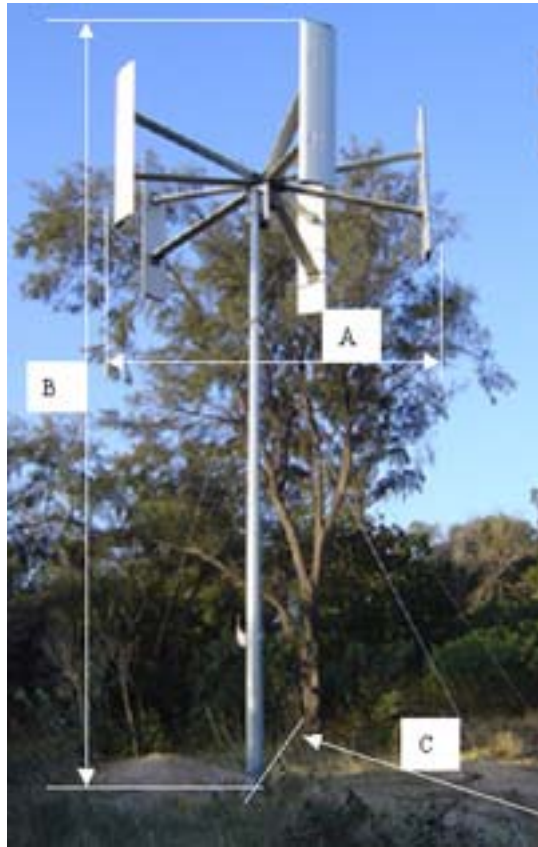


Vjetroturbina s vertikalnom osi vrtnje - Darriusova turbina

- Koristi vjetar iz svih smjerova.
- Generator je smješten na tlu.
- Poteškoće u izrada specijalno zakrivljenih lopatica.
- Nije samopokretan
- Ukupna iskoristivost malena.
- Donji dio rotora se nalazi u području graničnog sloja.



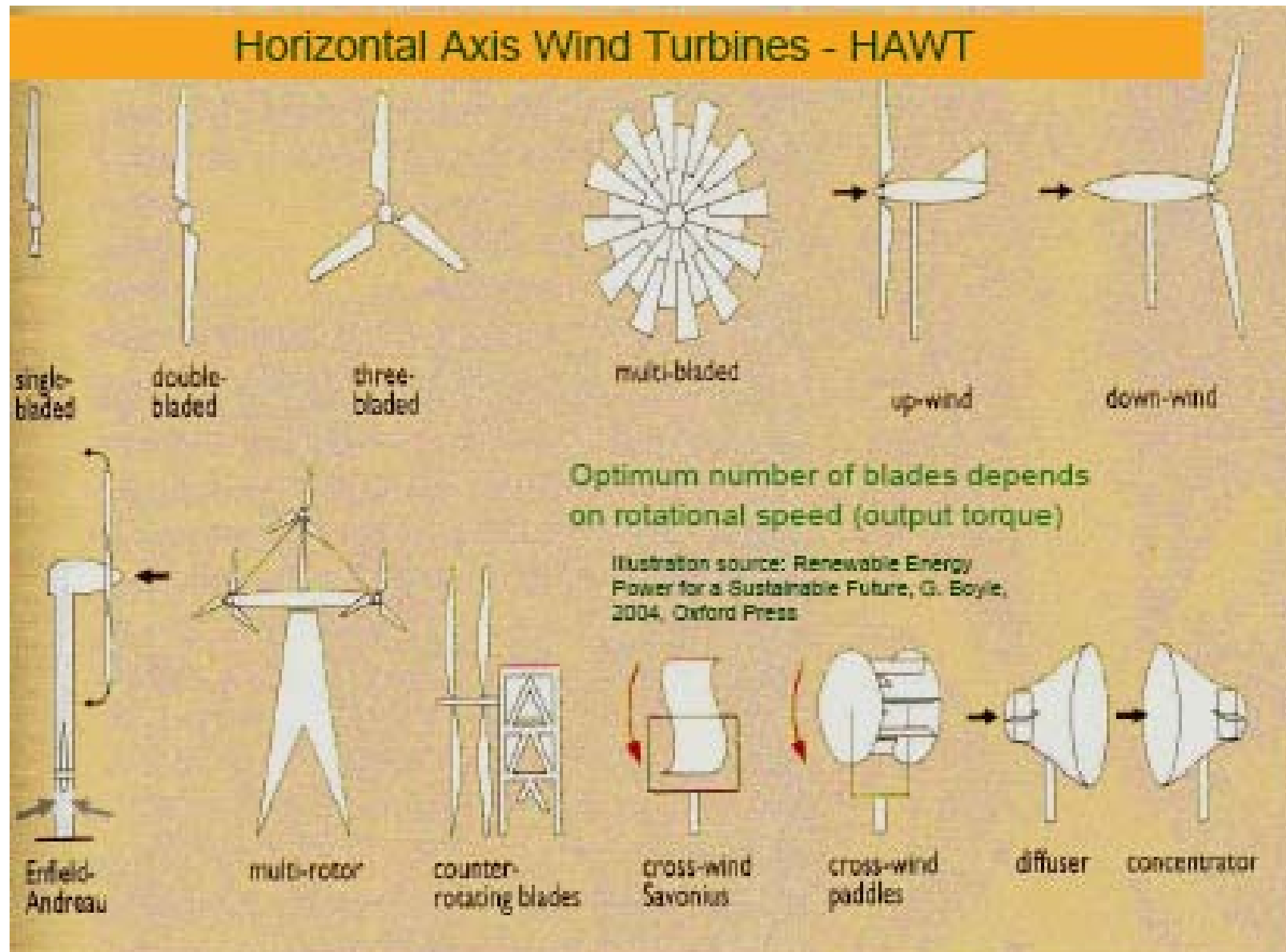
Snage vjetrogeneratora s vertikalnom osi do 1 MW u Kini



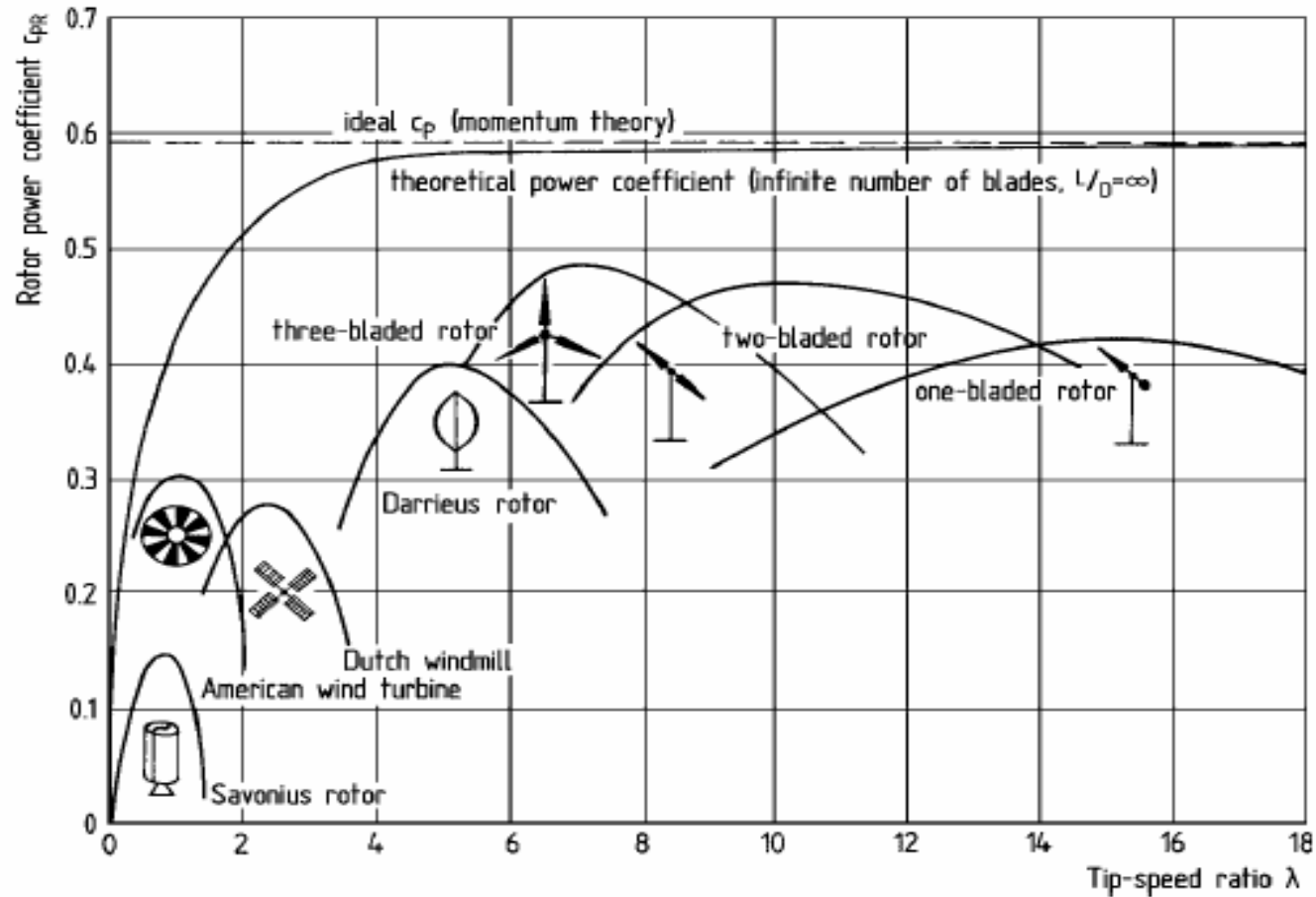
Nazivna snaga kW	Brzina vjetra startna/nazivna/maksumalana m/s	Promjer /visina m	Cjena \$
1.6	1.8/10/63	2/2	6,902
3.2	1.8/10/63	3/3.5	13,666
6	1.8/10/63	4/4	25,367
12	1.8/11/63	5.2/5.2	49,719
30	1.8/11/63	9/8	121,814
60	1.8/11/63	11/10.5	219,265
120	1.8/12/63	14/13	350,824
360	1.8/12/63	24/24	841,976
540	1.8/12/63	31/31	1,158,300
720	1.8/12/63	38/38	1,372,800
1080	1.8/12/63	46.5/46.5	1,825,200

Do danas su razvijeni vjetrogeneratori s vertikalnom osi do 3 MW

Vjetroturbine s horizontalnom osi



Koeficijenti snage različitih tipova vjetroturbina



Koeficijent snage u ovisnosti o odnosu obodne brzine i brzine vjetra

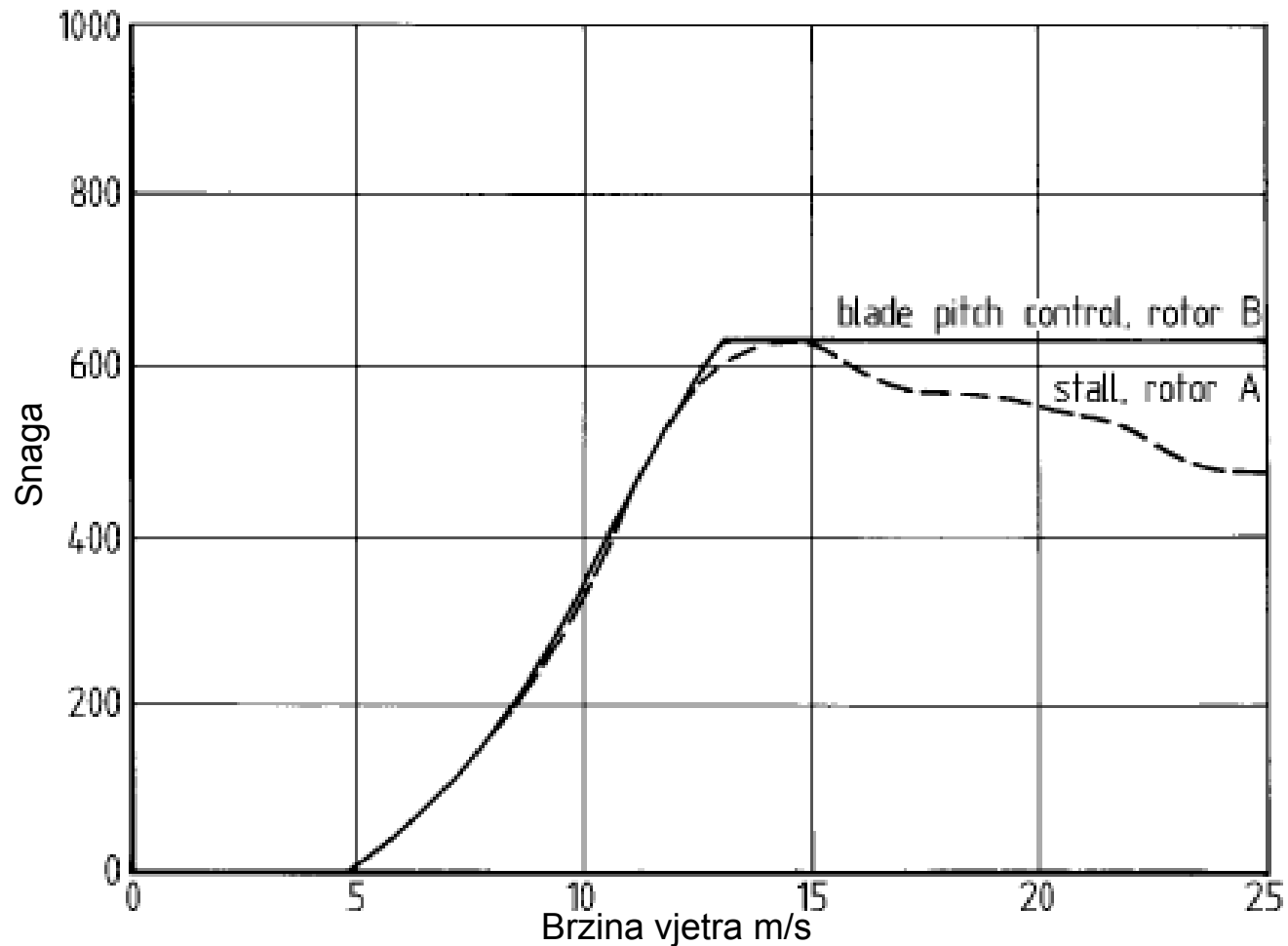
Zaštita od prekoračenja broja okretaja- zaštita od prejakog vjetra

- Pomicanje osi lopatice izvan područja djelovanja vjetra.
- Postavljanje lopatica pod napadni kut da se slomi uzgon.
- Aerodijanski slom uzgona pomoću flapsova (zakrilaca).

Zahtjevi na konstrukciju strojeva

- Visoka iskoristivost kod malih brzina vjetra uz preživljavanje kod velikih brzina.
- Zahtjev na veće zahvate energije vjetra
 - Visoki stupovi
 - Dugačke lopatice
- Lomovi uslijed zamora zbog “mahanja” (flater) lopatica
- Problem leda.
- Zahtjev na visoku pouzdanost.
 - vjetroagregat 8760 sati/godini =
automobil 650.000 km/godini

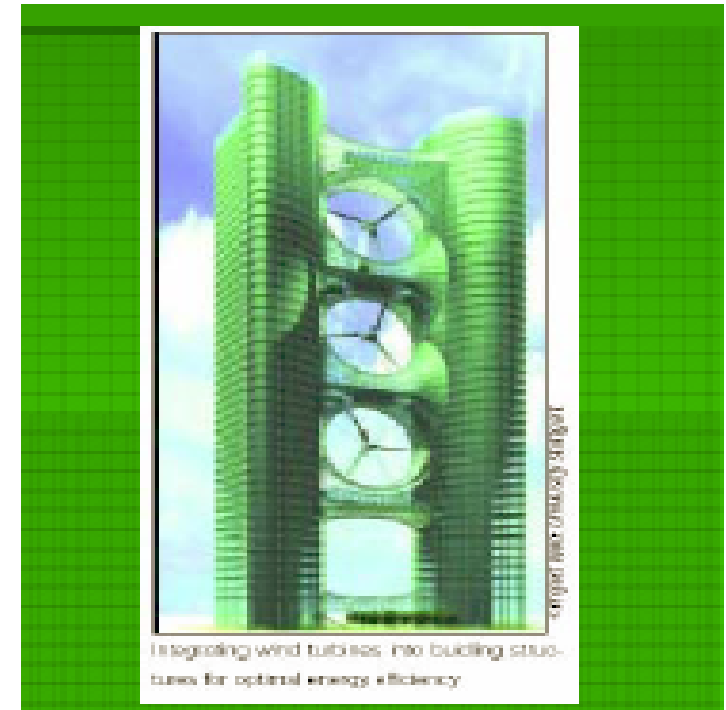
SKEV krivulje snage određuju performanse u rasponu brzina vjetra



Snaga vjetroturbine u ovisnosti o brzini vjetra i regulaciji zakretanjem lopatica

Uklapanje vjetroturbina u urbanu arhitekturu

- Mogućnost ugradnje vjetroturbina u Venturi oblikovanu geometriju građevina u svrhu lokalnog povećanja brzine vjetra.
- Mogućnost korištenja jeftinijih turbina uz koncentraciju vjetra.
- Sustav prihvaća samo jedan smjer vjetra.



Utjecaj na okoliš

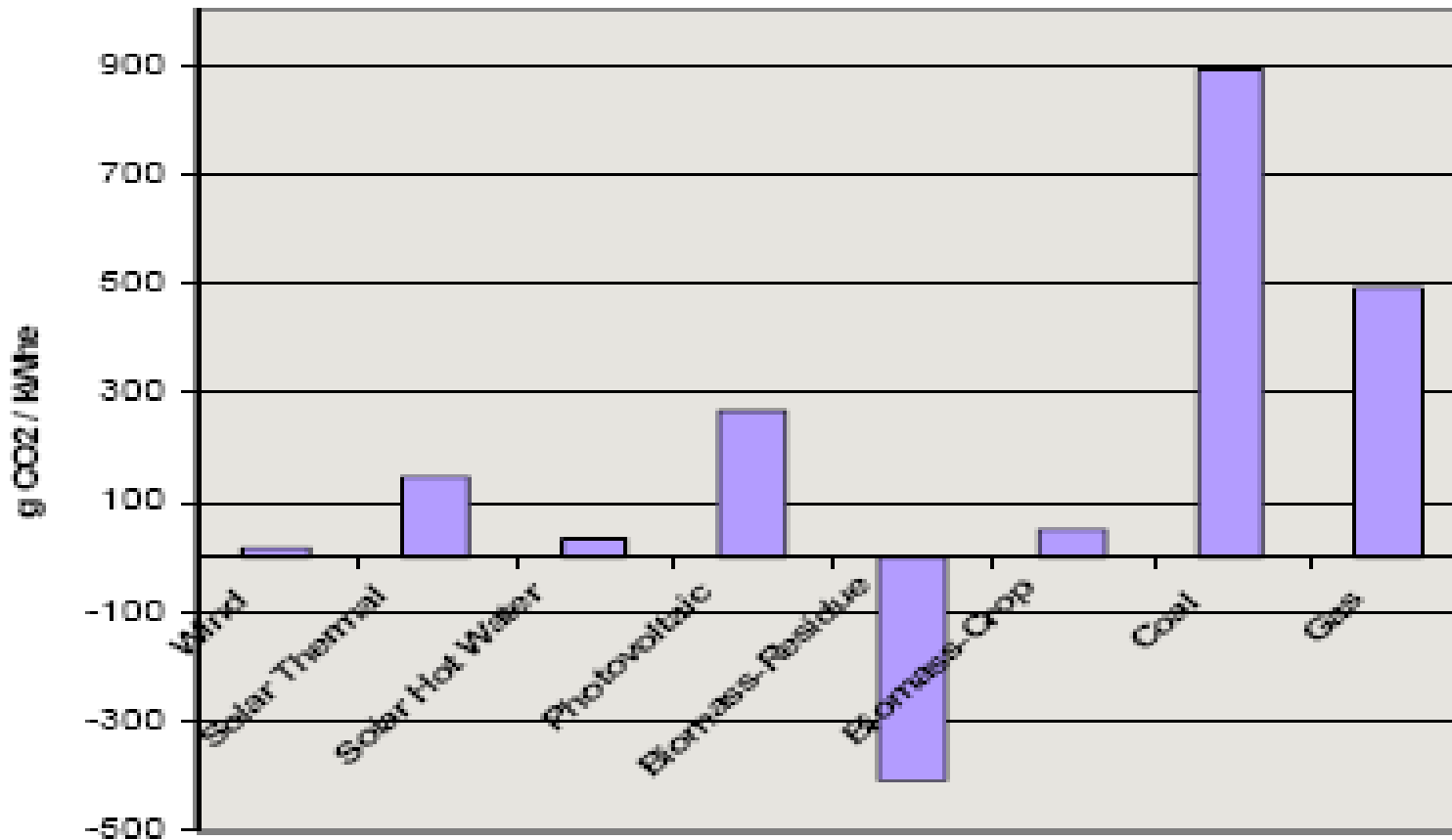
- Pozitivni utjecaji:

- Smanjenje zagađivanja zraka
- Smanjenje emisiju ugljika
- Nije potrebna voda za odvođenje toplinskih gubitaka

- Negativan utjecaj

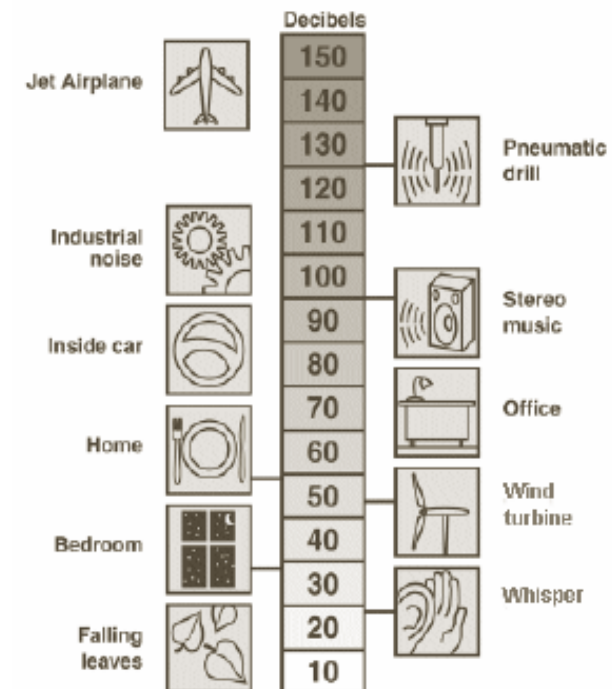
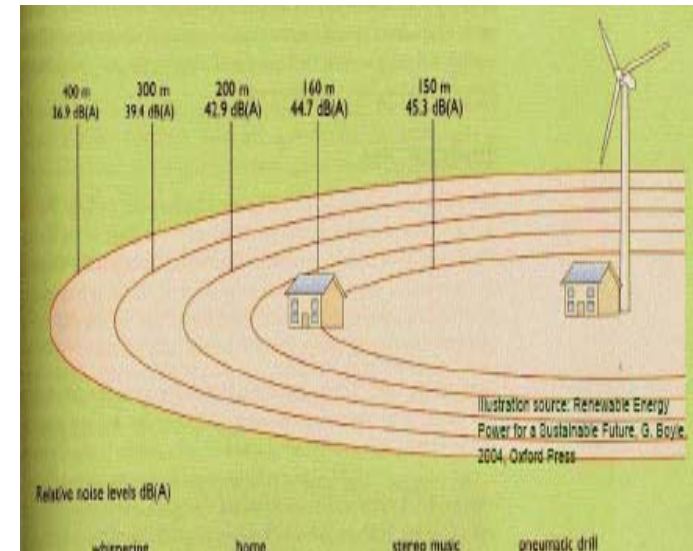
- Buka
- Elektromagnetska interferencija
- Vizualni utjecaj
- Reflektiranje svjetla za vrijeme zalaska i izlaska sunca
- Ugrožavanje ptica

Prosječna emisije ugljika g CO₂/kWh_e



Buka

- Dva su izvora buke kod vjetroturbina:
 - Mehnički izvori-reduktori, ležajevi
 - Aerodinamski izvori
- Kod modernih vjetroturbina, zbog poboljšane aerodinamike, buka je značajno smanjena.
- Mnogo su tiše od mnogih drugih izvora buke.



Buka i njen utjecaj na razvoj vjetroturbina

- Da se utvrdi udaljenost na kojoj se mora nalaziti obzirom na naselja, većina turbina prolazi ispitivanje buke tijekom proizvodnje.
- Ozbiljne se posljedice na okruženje mogu pojaviti ukoliko se ne razmotri taj vid utjecaja na okoliš.

Elektromagnetska interferencija

Rotacija vjetroturbine deformira signal između odašiljača i prijemnika što uglavnom ovisi o:

- materijalu lopatica
- obliku tornja
- Nemetalne lopatice apsorbiraju signal (suprotno od refleksije).
- TV signal se također može deformirati pa je potrebno koristiti kablovsku televiziju.
- Složeni signali zračne kontrola leta mogu međusobno interferirati, pa je nužno provesti potrebna usklađivanja

Ugrožavanje ptica

- Pomor ptica prilikom noćnih migracija značajno je smanjen izgradnjom većih turbina s manjim brojem okretaja.
- Jedna turbina prosječno usmrti 1-2 ptice godišnje.
- O čemu treba voditi računa pri zaštiti ptica?
 - Manje turbine s većim brojem okretaja su opasnije.
 - Velika gustoća vjetroagregata u vjetroelektranama.
 - Lokacija na putovima migracija ptica.
 - Ne može biti smještena u području gdje u okolini ima mnogo ptičjih staništa .

Vizualni efekt

- Često ovisi o različitostima socijalnih i psiholoških parametara:
 - Suprostavljanje promjenama u okolišu.
 - Razumijevanju tehnologija
 - Osobno sudjelovanje u projektu
 - Istraživanja su pokazala da se daje prednost elektranama na kopnu pred onima na moru



Energija vjetra na moru

- Ukupni troškovi izgradnje vjetroelektrana na moru su veći:
 - Ispitna postrojenja u Danskoj su pokazala da je trošak veći za 85% od izgradnje na kopno
 - Očekuje se da će s vremenom troškovi izgradnje na moru smanjiti



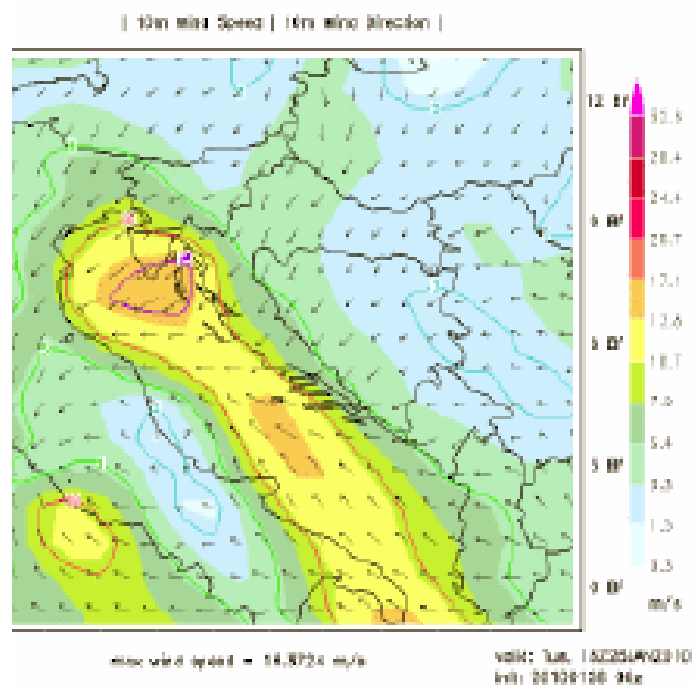
Energija vjetra na moru

- Brzine vjetra na moru su više i stabilnije nego na kopu pa je moguća veća proizvodnja električne energije.
 - Danska iskustva s vjetroelektranama na moru pokazuju proizvodnju 20 do 30% veću nego na modelskim ispitivanjima.
 - Vjetrovi su jači na većim udaljenostima od obale.
 - Raspoloživost im je i do 98 %.
 - Preporučljive dubine su 30 do 50 m.
 - Udaljenost najmanje 5 km od obale.
- Neke studije ukazuju na obogaćivanje flore i faune u području vjetroelektrana na moru.
 - Podvodni nosači preuzimaju ulogu grebena.
 - Ribari svjedoče o efikasnijem ulovu.

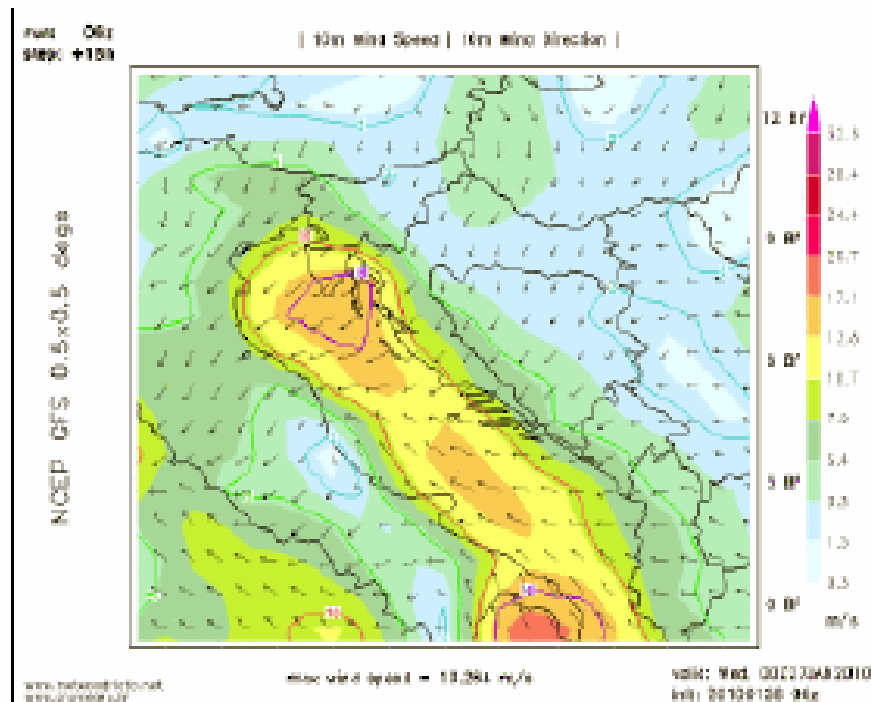
Primjer odnosa brzina vjetra na moru i kopnu Jadrana 26.01.2010.

Skala za vjetar 0-30 m/s

Prvih 6 sati



Drugih 6h



GFS daje prognoze za 7 dana unaprijed, a pokreće se 4 puta dnevno.

Zaključak

- Energija dobivena iz vjetra ne zagađuje okolinu.
- Potencijali energije vjetra su veliki i ona je danas energetska izvor s najvećim porastom.
- Energetska budućnost se značajno oslanja na vjetar.