

**AKADEMIJA TEHNIČKO VASPITAČKIH STRUKOVNIH
STUDIJA NIŠ**

ENERGIJA VETRA



KAKO NASTAJE VETAR?

- Ponekad, kad se nalazimo napolju, iznenada počne da duva vetar. Mi ga ne vidimo, ali ga osećamo, a ne znamo kako je nastao.
- Šta pokreće vazduh?
- Vetar je strujanje vazduha iznad Zemljine površine.



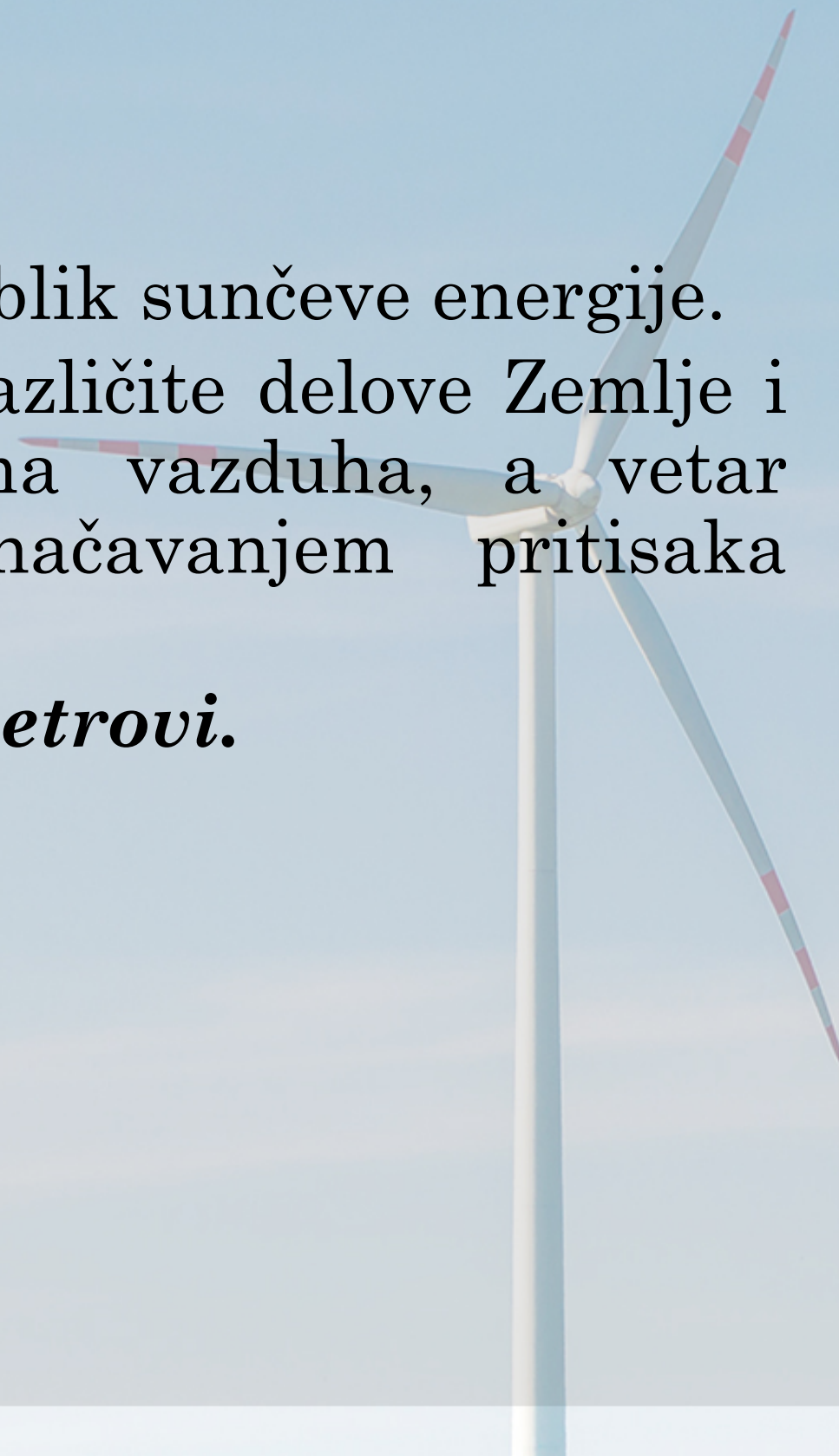
KAKO NASTAJE VETAR?

- Svi vetrovi nastaju na isti način — **usled promene temperature**. Kada se vazduh zagreje, on se širi, postaje lakši i diže se uvis, a hladniji dolazi na njegovo mesto. Ovakvim kretanjem vazduha postaje vetar.
- **Vetar nastaje kao posledica nejednakog akumuliranja sunčeve toplote i predstavlja prirodan tok iz oblasti sa višim nivoom u oblasti za nižim energetskekim nivoom.**



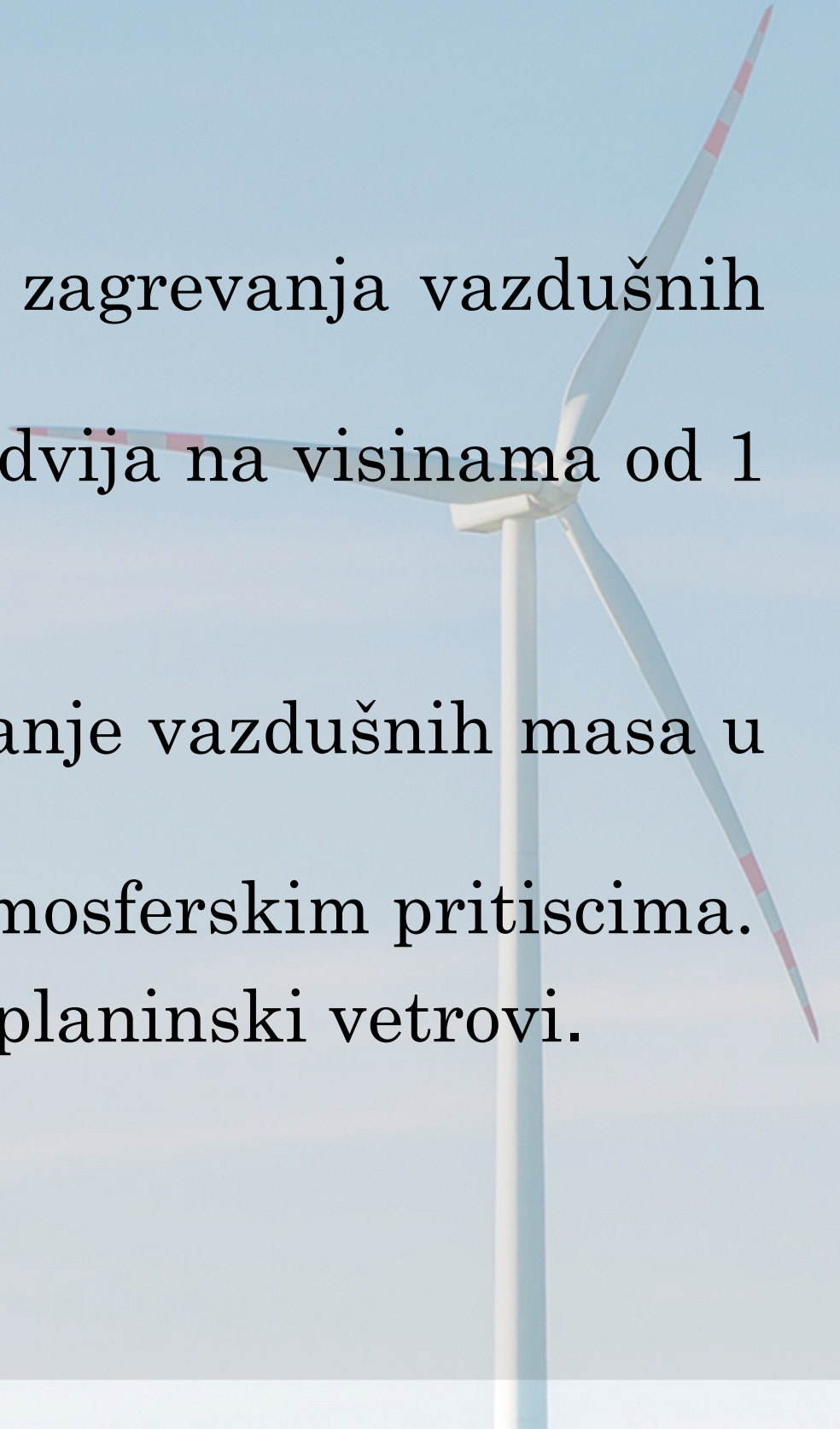
VRSTE VETROVA

- Energija vetra je transformisani oblik sončeve energije.
- Sunce neravnomerno zagrejava različite delove Zemlje i to rezultira različitim pritiscima vazduha, a vetar nastaje zbog težnje za izjednačavanjem pritiska vazduha.
- Razlikuju se *globalni i lokalni vetrovi*.



Globalni i lokalni vetrovi

- Globalni vetrovi su visinski.
- Nastaju kao posledica nejednakih zagrevanja vazdušnih masa u zemljinoj atmosferi.
- Ovo kretanje vazdušnih masa se odvija na visinama od 1 km do 10 km.
- Lokalni vetrovi predstavljaju kretanje vazdušnih masa u prizemnom sloju atmosfere.
- Nastaju zbog lokalnih razlika u atmosferskim pritiscima.
- Tipični lokalni vetrovi su morski i planinski vetrovi.



POLJE VETRA U ATMOSFERI

- **Sunce** je prvobitan izvor energije vetra.
- Sunčevo zračenje i izračavanje zemljine površine utiču na **razlike u vazdušnoj temepraturi**, a sa ovim nose i **nejednaku raspodelu vazdušnog pritiska**. Da bi atmosfera povratila svoju stabilnost , koja je poremećena u prostornoj raspodeli atmosferskog pritiska, u atmosferi se javljaju horizontalna i vertikalna vazdušna strujanja.
- **Horizontalna vazdušna strujanja** nazivaju se vetar.
- **Vertikalna vazdušna strujanja** nazivaju se uspona ili nispona (zavisno da li struje od zemlje uvis ili obratno)

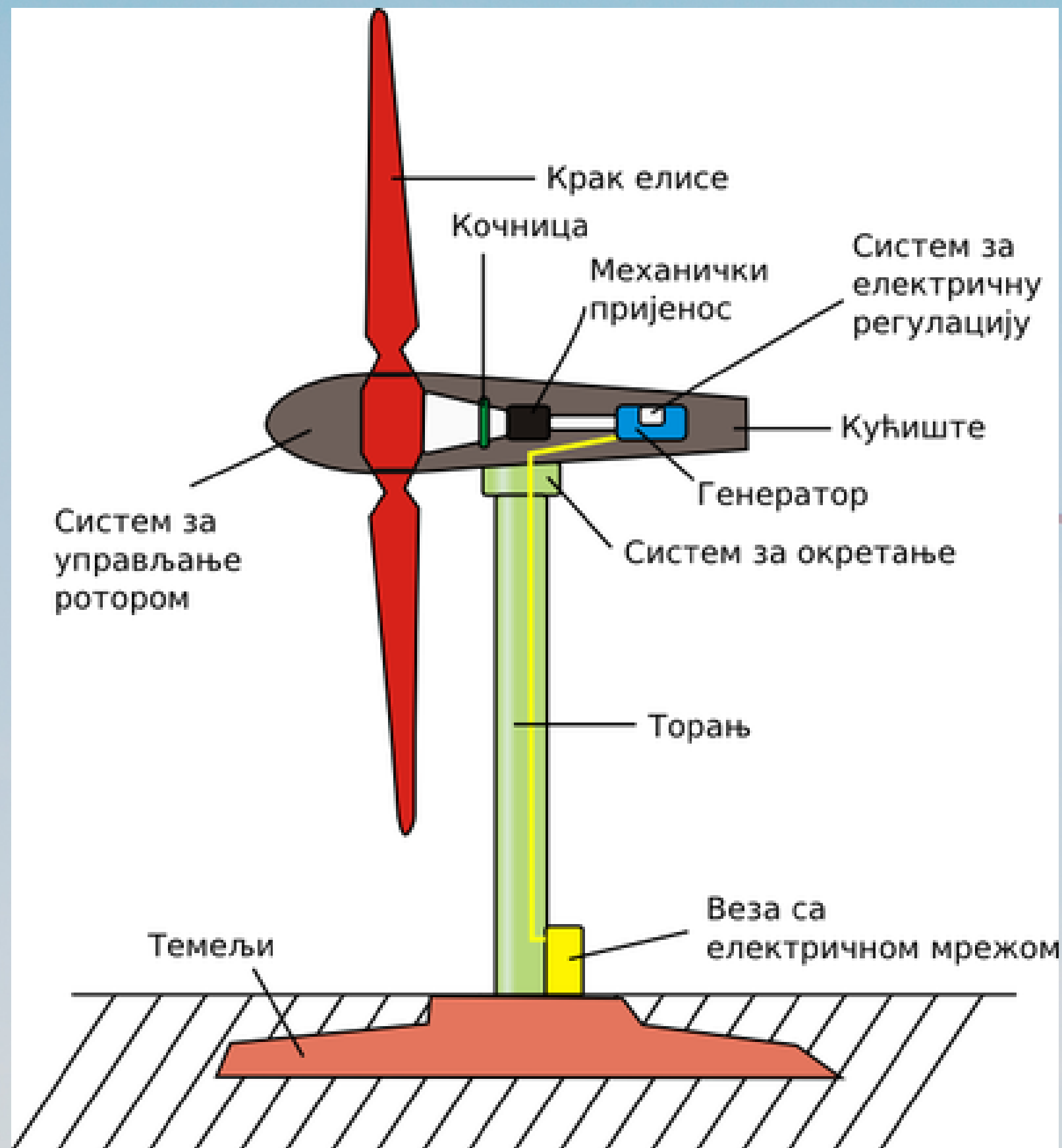
MERENJE PRAVCA I BRZINE VETRA

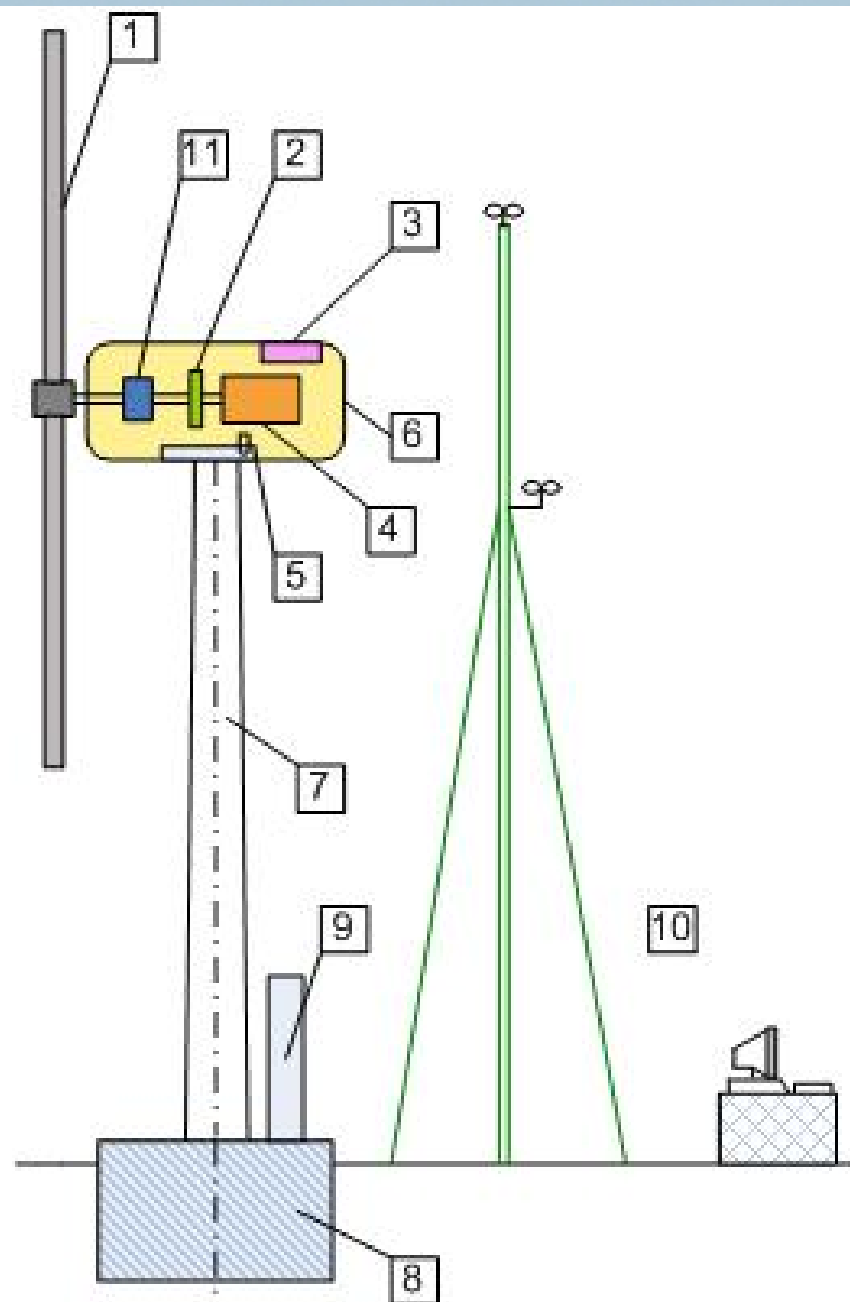
- Podaci o vetru ubrajaju se u najznačajnije elemente meteorologije (ali i u nekim granama privrede, građevinarstvu, zaštiti i unapređenju životne sredine, ekologiji i dr.)
- Vetar je određen kada su mu poznati: pravac, brzina i jačina.
- Pravac vetra se obeležava onom **stranom sveta** odakle vetar duva (severni, južni...).
- **Brzina vetra** se izražava u **metrima u sekundi**, čvorovima, kilometrima na čas, miljama na čas i dr.
- **Jačina vetra** predstavlja silu kojom vetar deluje na pojedine predmete u prirodi. Jačina vetra se određuje prema Boforovoj skali.

ENERGETSKI IZVOR

- Pored vekovne uloge vetrenjače za dobijanje mehaničke energije, odnosno za pumpanje vode, savremeni vetrogeneratori pretvaraju energiju vetra u električnu energiju. **Proizvodnja električne energije** u vetrogeneratorima zavise od brzine vetra, kao i od dužine trajanja vetrovitog vremena.



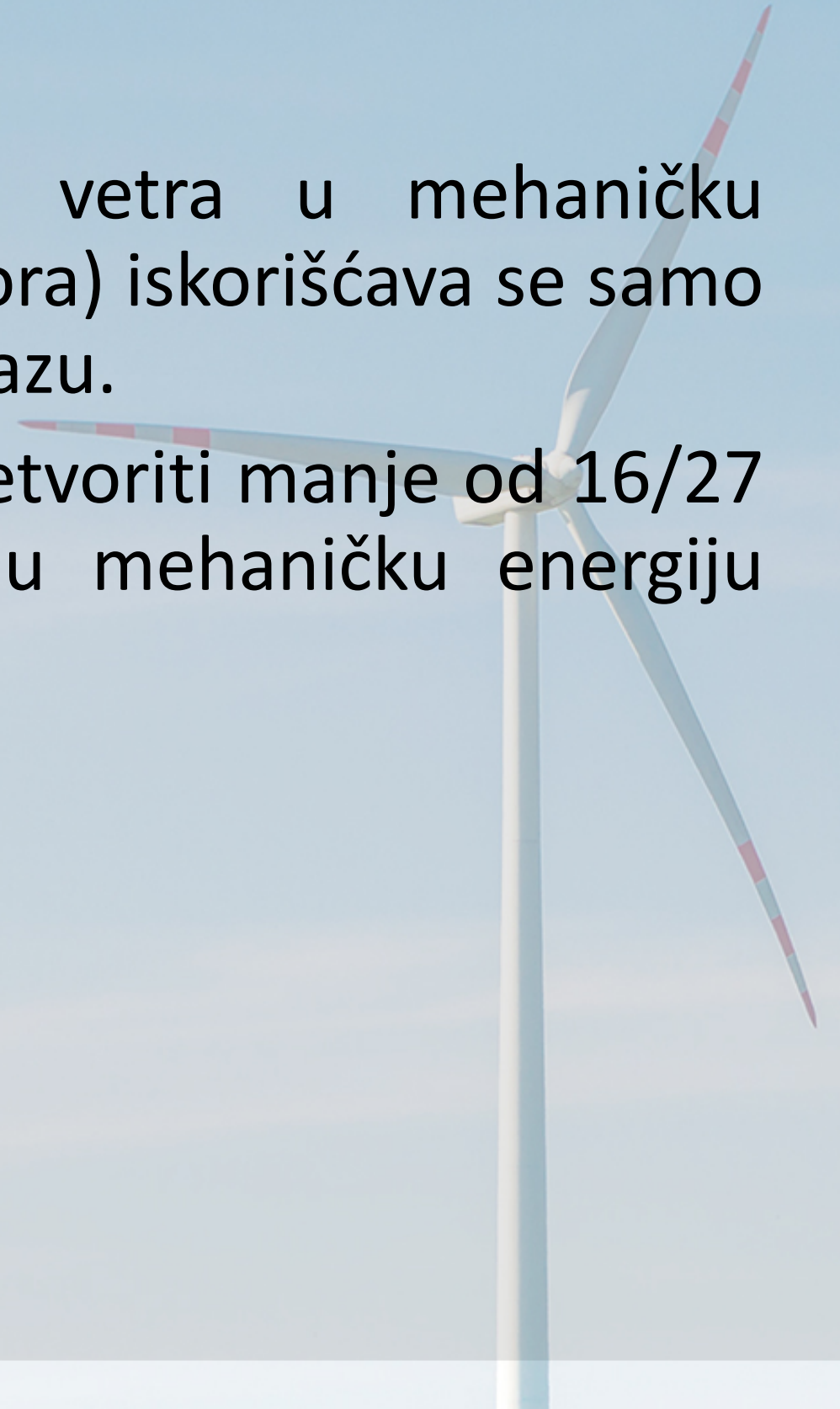




- (1) rotor
- (2) kočnice
- (3) upravljački i nadzorni sistem
- (4) generator
- (5) zakretnik
- (6) kućište
- (7) stub
- (8) temelj
- (9) transformator
- (10) posebna oprema
- (11) prenosnik snage

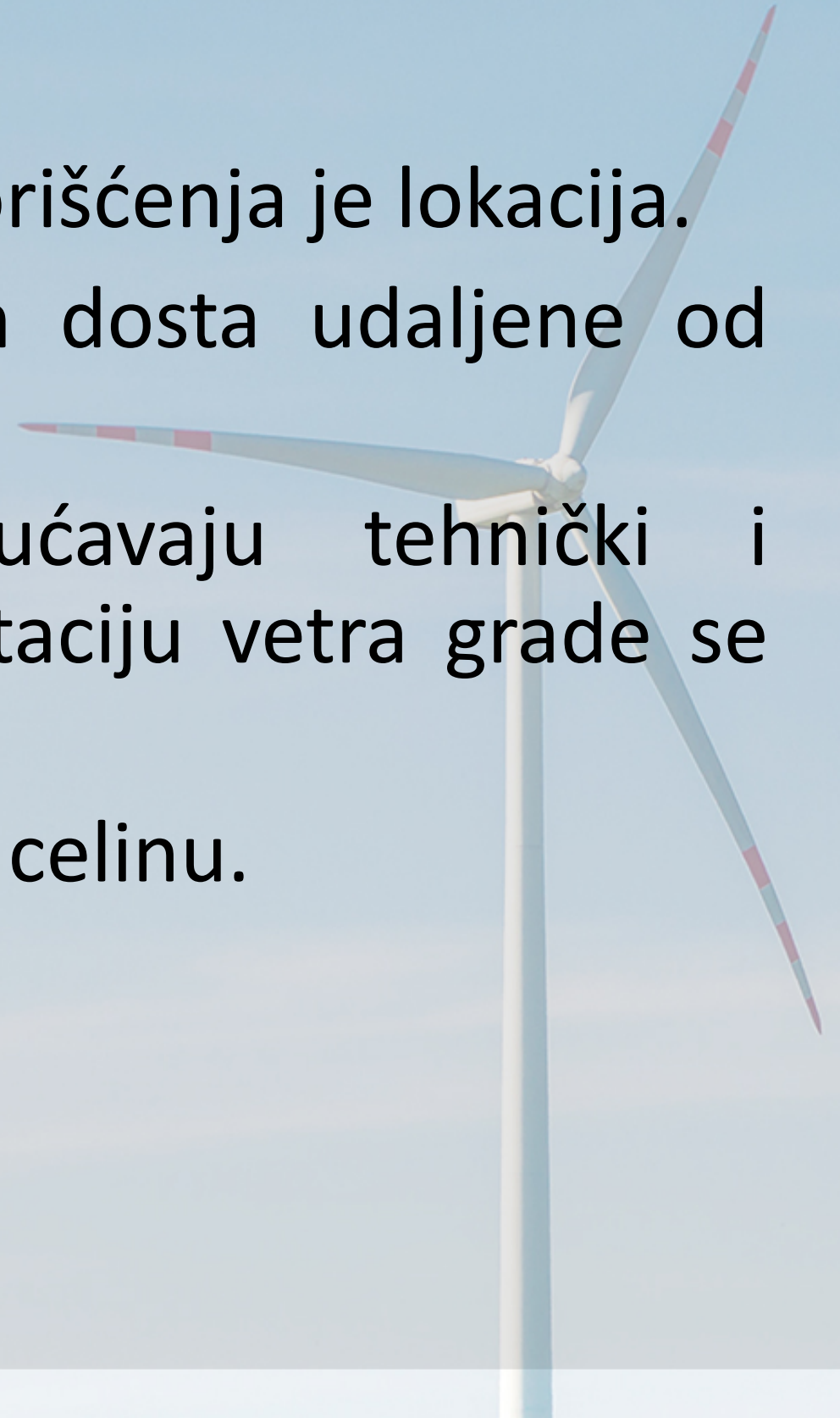
ENERGETSKI IZVOR

- Pretvaranjem kinetičke energije vetra u mehaničku energiju (okretanje vratila generatora) iskorišćava se samo razlika brzine vetra na ulazu i na izlazu.
- Betz-ov zakon kaže da možemo pretvoriti manje od $\frac{16}{27}$ ili 59% kinetičke energije vetra u mehaničku energiju pomoću vetroturbine.

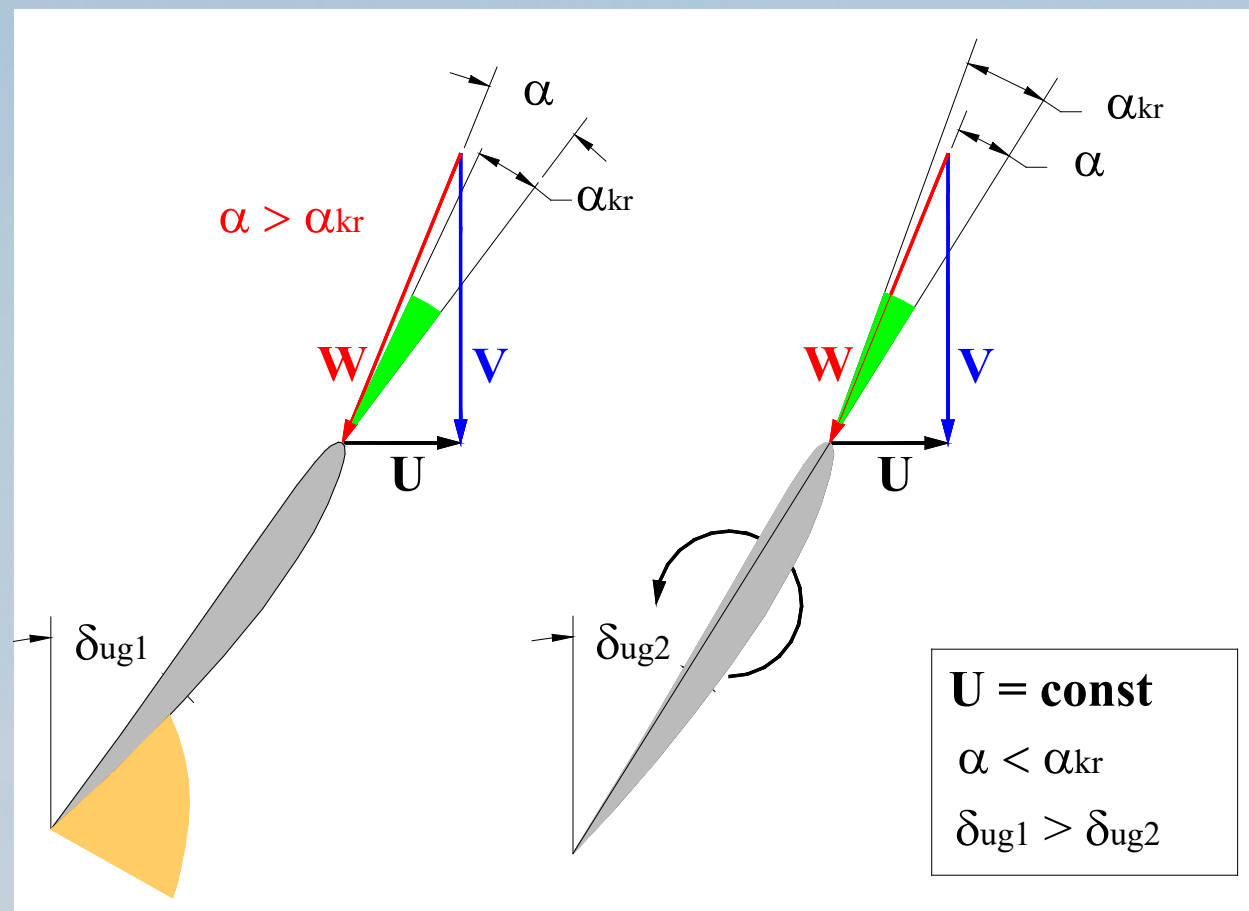


ENERGETSKI IZVOR

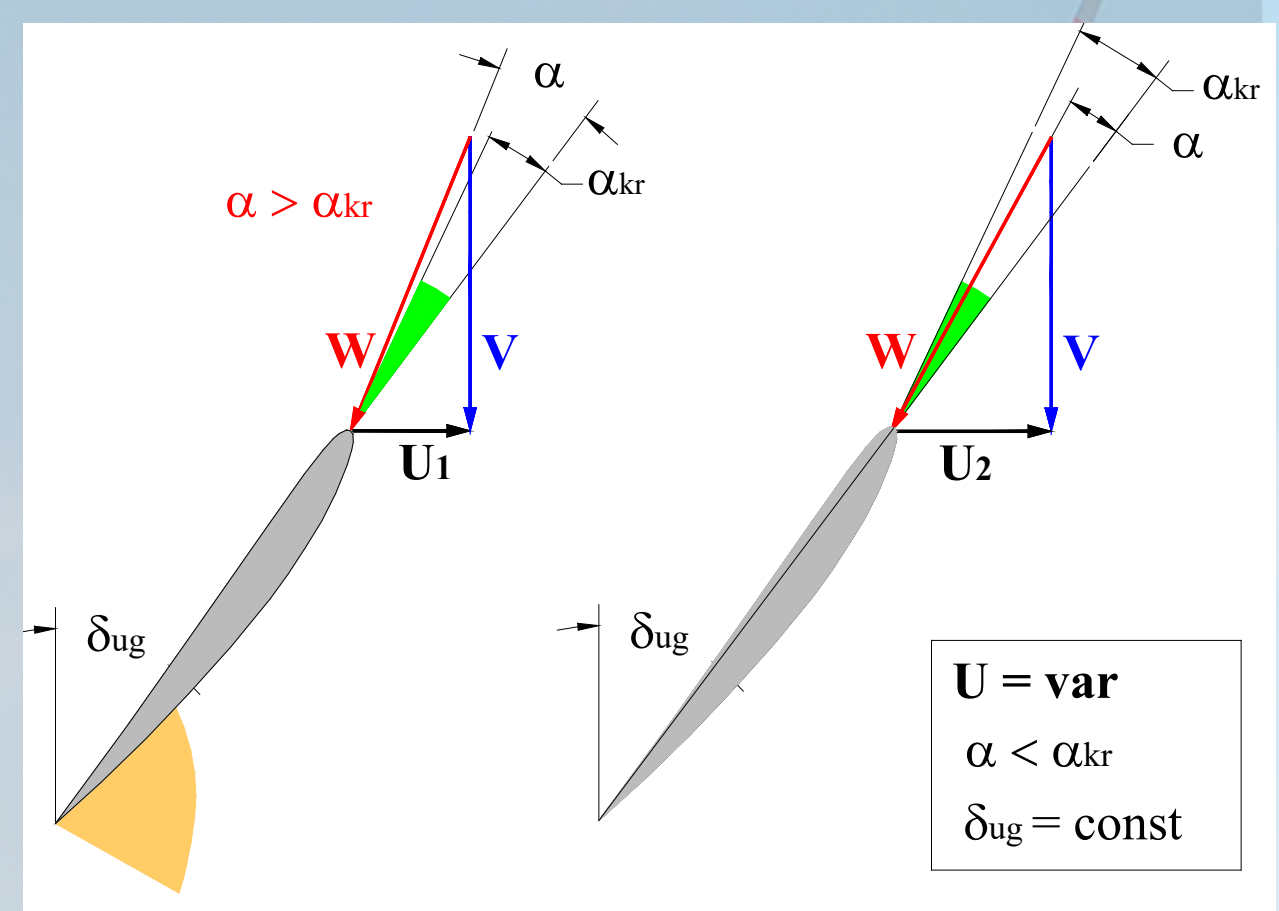
- Osnovni faktor ekonomičnog korišćenja je lokacija.
- Vetrovite oblasti su uglavnom dosta udaljene od naselja i distributivnih mreža.
- Na lokacijama koje omogućavaju tehnički i ekonomski opravdanu eksploataciju vetra grade se vetroelektrane.
- Više vetroagregata grupiše se u celinu.



ENERGETSKI IZVOR

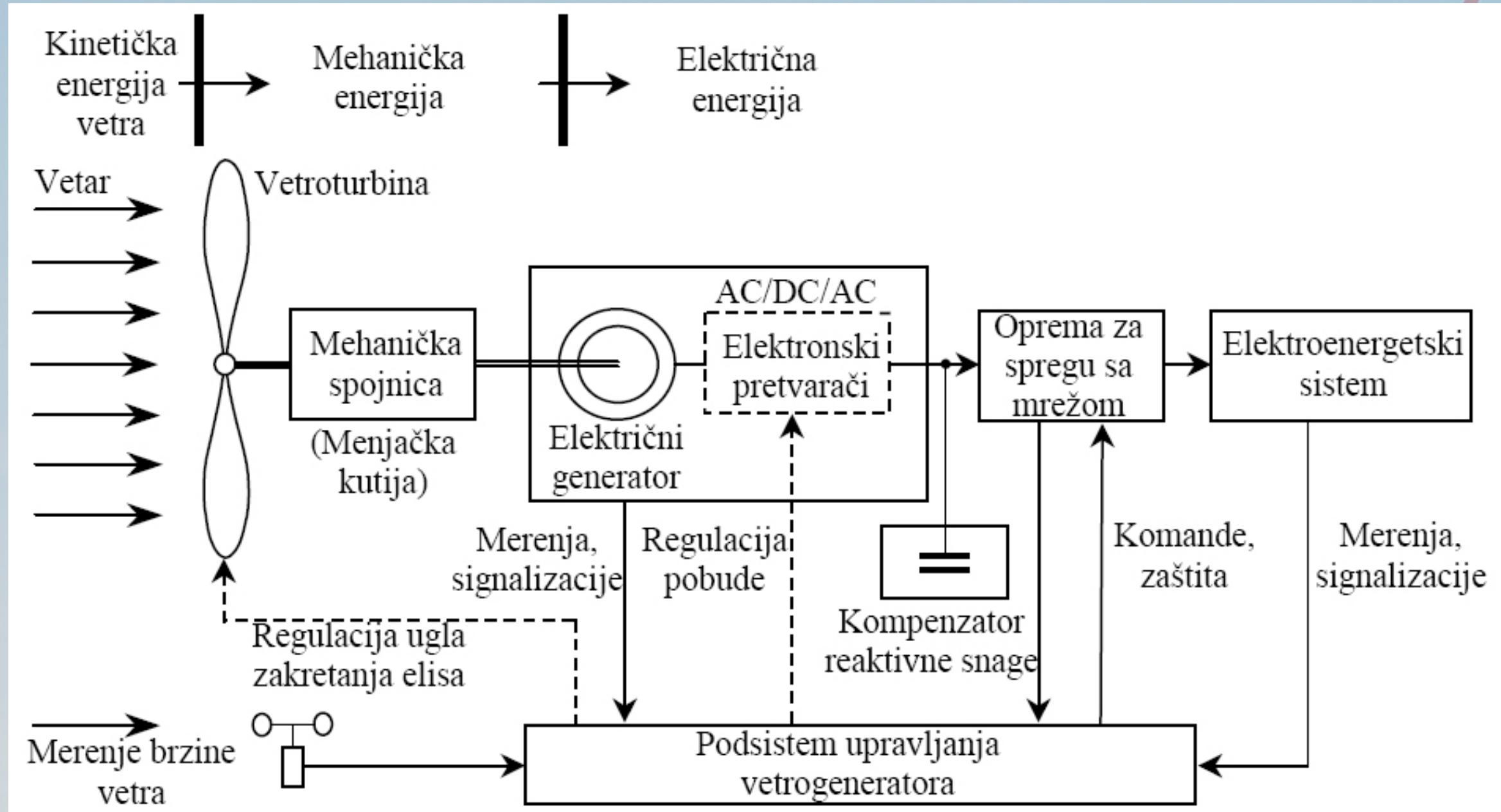


Regulisanje snage promenom nagiba lopatica

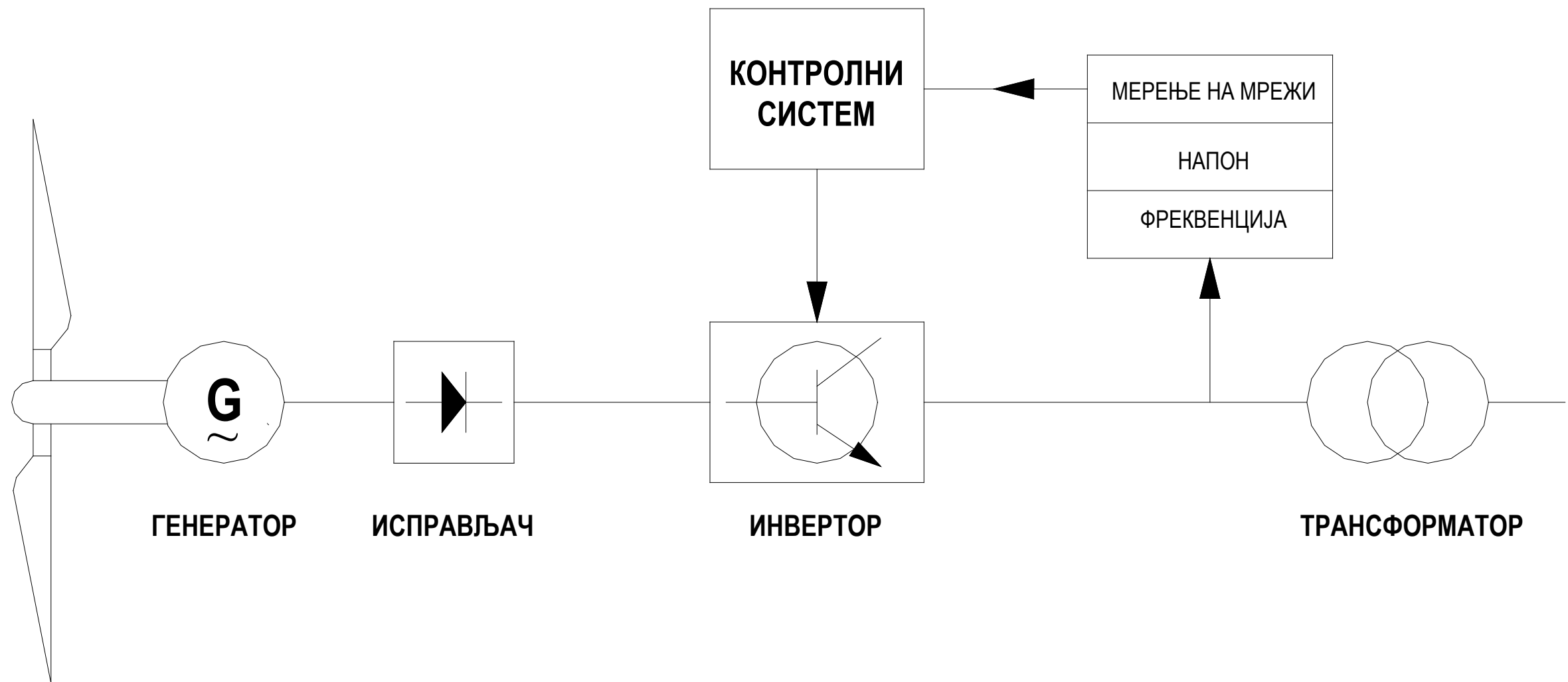


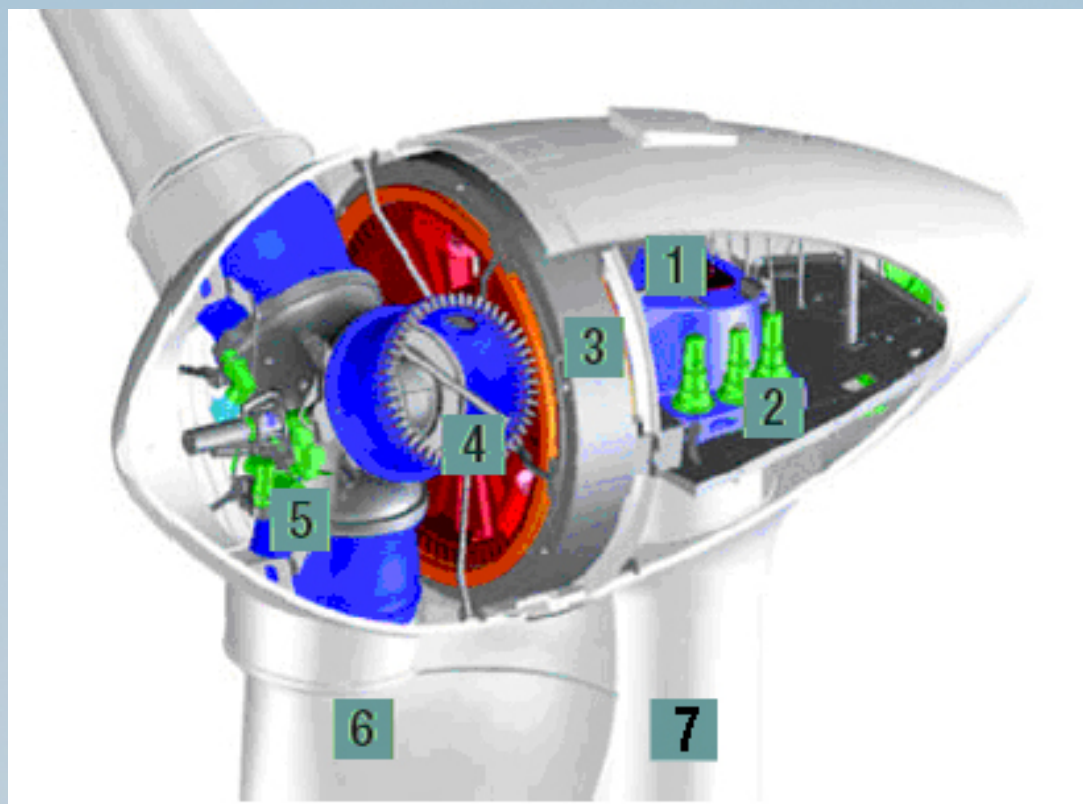
Regulisanje snage aktivnom promenom broja obrtaja

Blok šema vetrogeneratorske turbine



Sistem za kontrolu i monitoring rada turbine na mreži





Enercon E-82

- 1-gondola
- 2-obrtna platforma
- 3-elektrogenerator
- 4-mehanizam za promenu nagiba lopatice
- 5-kupola glavčine rotora
- 6-lopatica
- 7-stub

E-82	
Konstruktivni stil	Direktan pogon
Prečnik rotora	82 m
Aktivna površina	3959 m ²
Broj obrtaja	6 - 21.5 o/min
Opseg rada	2.5 – 28 (32) m/s
Regulacija snage	Nagib lopatice
Broj lopatica	3
Tip generatora	Sinhroni, višepolni
Nominalna snaga	2000 kW
Zaštita	IP 54
Hlađenje	Kombinovano
Tip	Direktni pogon
Prenosni odnos	
Proizvođač	
Vazdušno kočenje	Nagib lopatice- 88°
Mehaničko kočenje	Dvostruke – disk kočnice
Zaštita od korozije	Boja



TEHNIČKI STATUS

- Tokom poslednje tri generacije efikasnost vetrogeneratora je naglo povećana. Statistika pokazuje da modeli koji godišnje proizvode 55kW danas **proizvode 52% više energije nego stariji**. Ovaj porast efikasnosti rezultat je prepravki, gradnje viših tornjeva, veća površina rotora i dr. pri istoj snazi
- Poslednjih godina zastupljen je trend porasta fizičke veličine i snage vetrogeneratora. Današnji trend je da vetrenjače raspolažu snagom od 2 – 8 MW, dakle snažnije 10 i više puta od ranije korišćenih (100-200KW)



TROŠKOVI PROIZVODNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE iz energije vetra

- **prethodni radovi**
- **troškovi pripreme projekta i troškovi infrastrukture** (u zavisnosti od lokalnih okolnosti kao što su zemljište, putevi, blizina prenosne elektro-mreže i sl. Troškovi pripreme projekta se delimično umanjuju udruživanjem farmi vetrenjača i njihovim zajedničkim radom)
- **troškovi rada i održavanja** (servis, popravke, osiguranje, administracija, potrošni delovi. Troškovi starijih tipova vetrogeneratora iznose 1-2 evro centa/kWh)
- **raspoloživošću - broj vetrovitih dana** (sposobnost rada vetrogeneratora pri brzini vetra iznad minimale – prosečno oko 98%)
- **tehničkim vremenom trajanja** (oko 20 godina. Pojedine komponente moraju biti zamenjene ili obnovljene u kraćim intervalima. Delovi upravljačkog sistema menjaju se u razdobljima od 5 godina, ležajevi u razdoblju od 10 godina)
- **periodom amortizacije**
- **realnom kamatnom stopom**
- **prosečna brzina vetra na posmatranom odredištu**

PROSEČNA BRZINA VETRA NA LOKACIJI

- Od velike važnosti za troškove energije.
- Snaga vetrogeneratora povećava se sa trećim stepenom brzine vetra, dok troškovi na isti način opadaju, važi sledeći izraz:

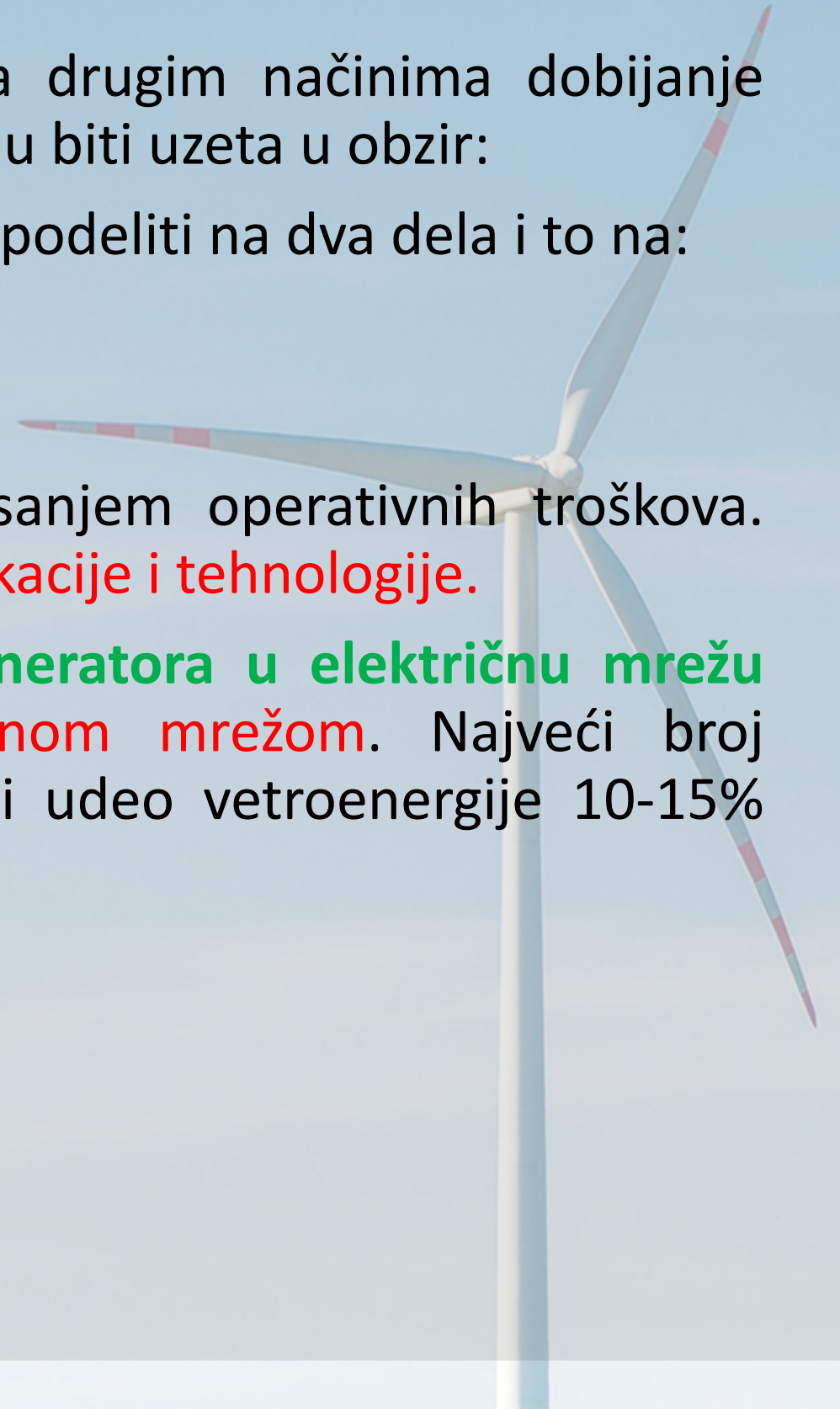
$$E = bV^3 kWh/m^2$$

- **b** – faktor performance. Zavisi od efikasnosti sistema vetreofeneratora i statističke distribucije brzine vetra. Imajući u vidu poznatu vetrovitost lokacije i razumnu usklađenost između instalisane snage vetrogeneratora, površina rotora krila, faktor b može se koristiti za određivanje karakteristika sistema. U zemljama zapadne Evrope, $b=3,15$.
- **E** – godišnja proizvodnja



OGRANIČENJE PRIMENE

- Pri poređenju vetroenergetskih sistema sa drugim načinima dobijanje električne energije, dva značajna faktora moraju biti uzeta u obzir:
 - **ekonomska izvodljivost** (ovaj faktor se može podeliti na dva dela i to na:
 - 1) troškove održavanja i rada,
 - 2) kapitalne troškove.
 - Značajne uštede se mogu ostvariti eliminisanjem operativnih troškova. Kapitalni troškovi mogu **varirati zavisno od lokacije i tehnologije**.
 - **tehnička ograničenja povezanosti vetrogeneratora u električnu mrežu** (**uskalđenost sa priključnom elektroprenosnom mrežom**. Najveći broj distributivnih preduzeća preferira da ograniči udeo vetroenergije 10-15% ukupne snage)

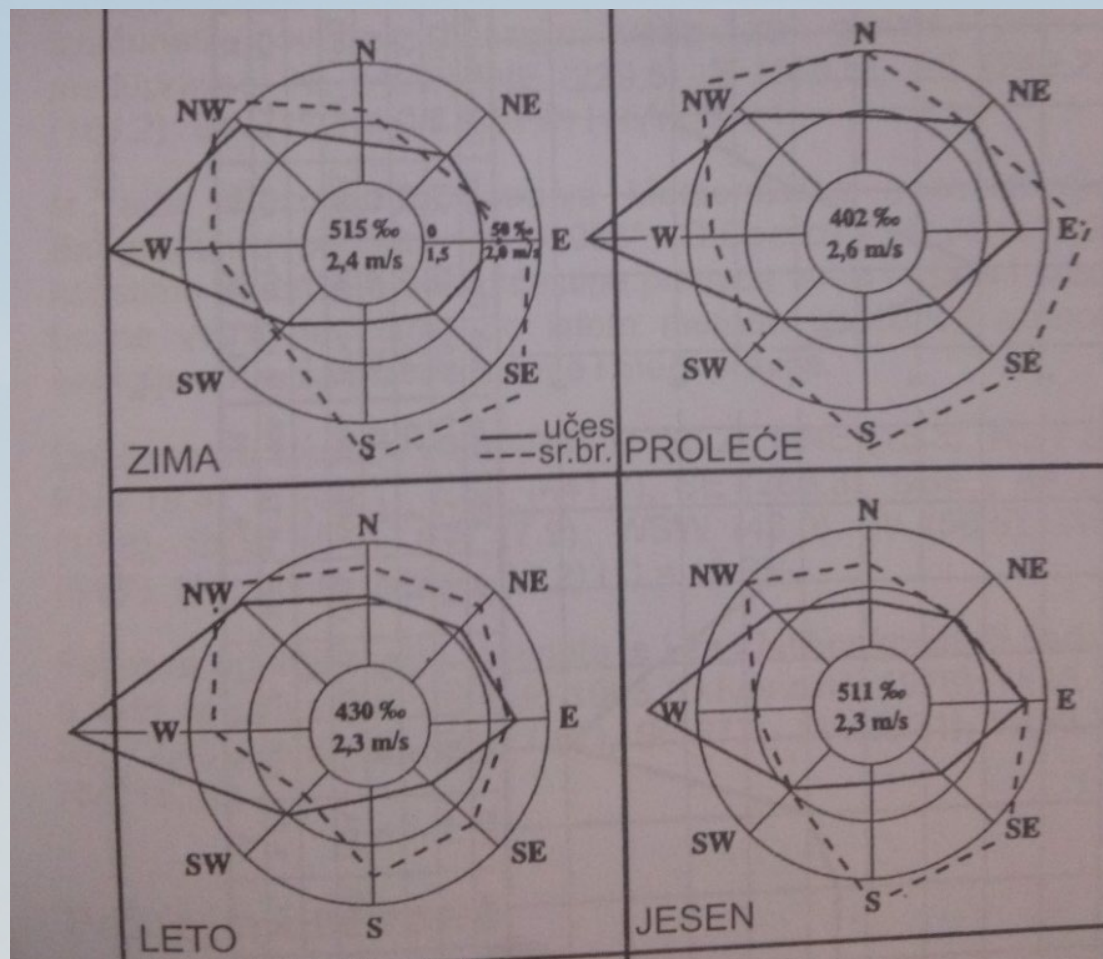


KRITIČNI FAKTORI

- - **Vetrovitost lokacije**
- **Efikasnost vetrogeneratora** – Što je **viši stub vetrenjače** i što je veća površina zahvaćena krilima više će biti proizvedeno električne energije.
- **Poboljšani dizajn** – Razvoj većih turbina i optimiziranje dizajna i tehničke konstrukcije trebalo bi da poboljša **odnos ulazna/izlazna snaga** za oko 10-20%. Savremeni elektronski monitoring i kontrola rada, aerodinamika lopatica i ostala poboljšanja takođe utiču na smanjenje troškova.
- **Troškovi rada i održavanje** – Pri istoj brzini vetra od 8m/s dve vetro farme sa istim tipom ali različitim brojem vetrogeneratora, imale su različite troškove proizvodnje električne struje. Manja farma, snage 3MW, proizvodila je struju uz troškove od 0,06centi/kWh. Veća farma, snage 51MW, proizvodila je struju uz troškove 0,036centi/kWh ili skoro 40% jeftinije. Ipak, postoje mogućnosti da će se troškovi uvećati sa protekom vremena i budućim kvarovima. Naročito ako se radi o vetrenjačama lociranim na pučini ili visokim planinama
- **Trajanje vetrogeneratora** – Nedovoljno poznato zbog ograničenog dosadašnjeg vremena rada. **Korisnički vek između 15-25 god.** Veći remontu u iznosu od 20-50% od ukupnih investicionih troškova mogu se očekivati posle 10-te godine.

IZBOR MESTA ZA POSTAVLJANJE VETROGENERATORA

- **Ruža vetrova** – vetrovi iz raznih pravaca se ne javljaju jednako često (u Beogradu zimi pretežno duva jugoistočni vetar, a leti zapadni i severozapadni gotovo iz suprotnog pravca)
- Za jednostavniji i očigledniji pregled o čestini vetrova iz različitih pravaca osmišljen je **grafički prikaz koji se zove ruža vetrova**.



IZBOR MESTA ZA POSTAVLJANJE VETROGENERATORA

- **Postojanost vetra** - je važan element za praktična razmatranja pri izboru mesta za postavljanje veterogeneratora u lokalitetu korisnika. Pod postojanošću vetra podrazumeva se koeficijent između brzine srednjeg vektora vetra i prosečne brzine bez obzira na pravac vetra.
- **Raspodela brzine vetra sa visinom** – da bismo dobili podatke o vetru na visini povoljnoj za veterogenerator, gde je vetar oslobođen uticaja hrapavosti terena, potrebno je na izabranom mestu u lokalitetu proračunati promenu brzine vetra sa visinom u zavisnosti od karakteristika hrapavosti terena i uticaja okolnih prepreka.
- Raspodela brzine vetra sa visinom $\frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{h_1}{h_2}\right)^n$
 - V_1 – brzina vetra na visini generatora (h_1)
 - V_2 – brzina vetra na visini generatora (h_2)

IZBOR MESTA ZA POSTAVLJANJE VETROGENERATORA u ravnici

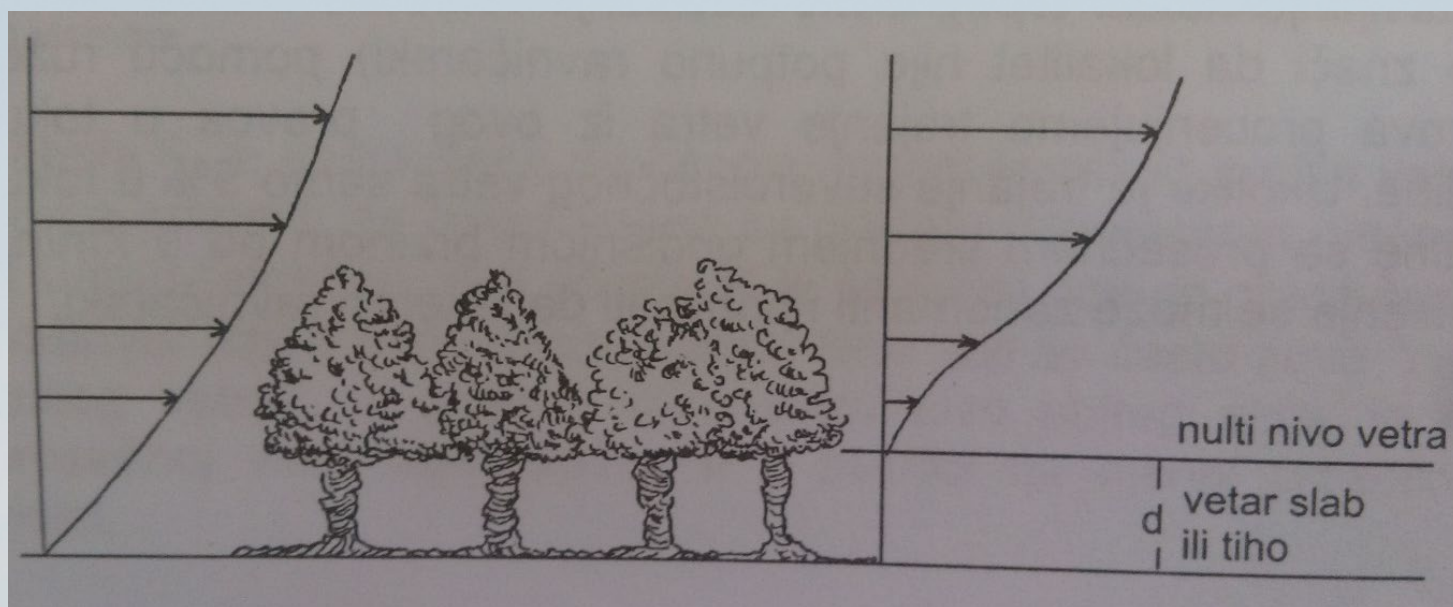
- Izbor mesta za postavljanje vetrogeneratora na ravničarskim predelima jednostavniji je nego u brdovitim i planinskim krajevima.
- Pogodan prostor za postavljanje vetrogeneratora u Srbiji je Vojvođanska ravnica.
- Izbor mesta u ravnici traži odgovore na osnovna pitanja: koliko hrapavost terena utiče na profil vetra i koliko mogu prepreke na terenu poremetiti slobodno strujanje vetra do vetrogeneratora.
- Nalaženje mesta za postavljanje vetrogeneratora u ravničarskom lokalitetu počinje sa **pregledom grafičke dokumentacije o ruži vetrova**. uz koju se dobija **ruža povoljne energije vetra**.



IZBOR MESTA ZA POSTAVLJANJE VETROGENERATORA u ravnici

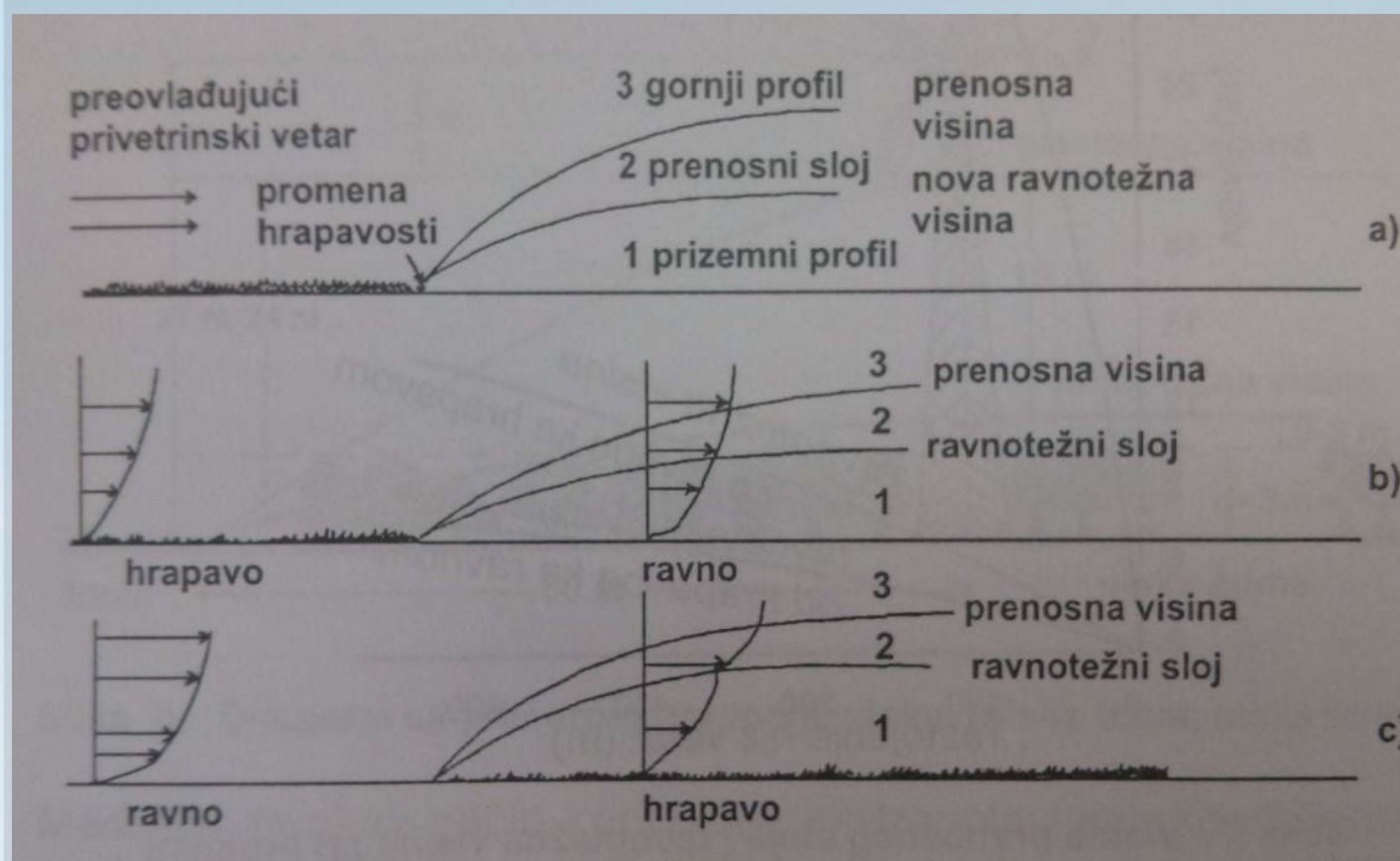
Ujednačena hrapavost i primena ekstrapolacionog koeficijenta – Ravničarski teren sa ujednačenom hrapavošću je **najjednostavniji tip terena** za izbor mesta vetrogeneratora.

- Za dobijanje povoljne energije vetra na terenu sa ujednačenom hrapavošću potrebno je povećati visinu stuba vetrogeneratora iznad zemljine površine.
- Treba uočiti nulti nivo vetra (deo iznad terena sa gustom vegetacijom – voćnjaci, šuma...). Ispod ovog nivoa vetar je slab i zove se nulti nivo vetra



IZBOR MESTA ZA POSTAVLJANJE VETROGENERATORA u ravnici

- Uticaj hrapavosti na profil vetra – kada se menja hrapavost može se prikazati grafički. Promena profila vetra u zavisnosti od hrapavosti terena obuhvataju strujanja neposredno iznad zemljine površine.



a) sile su uravnotežene pa se vetar može eksploatisati korišćenjem faktora hrapavosti terena u zoni 3. U sloju 2 vetar se menja od jednog do drugog profila – **teško je predvideti promene brzine vetra**

b) profil brzine vetra je veoma povoljan jer je hrapavost terena u privetrini veća nego na mestu izabranom za postavljanje vetrogeneratora. **Odnos brzine vetra i visine se smanjuje pa bi povećanje stuba vetrogeneratora doprinelo povećanju energije vetra.**

c) na mestu vetrogeneratora naglo menja brzina vetra sa visinom jer je na privetarskoj strani ravan teren a ispred i ispod vetrogeneratora hrapav teren. **Ovo zahteva povećanje stuba vetrogeneratora**

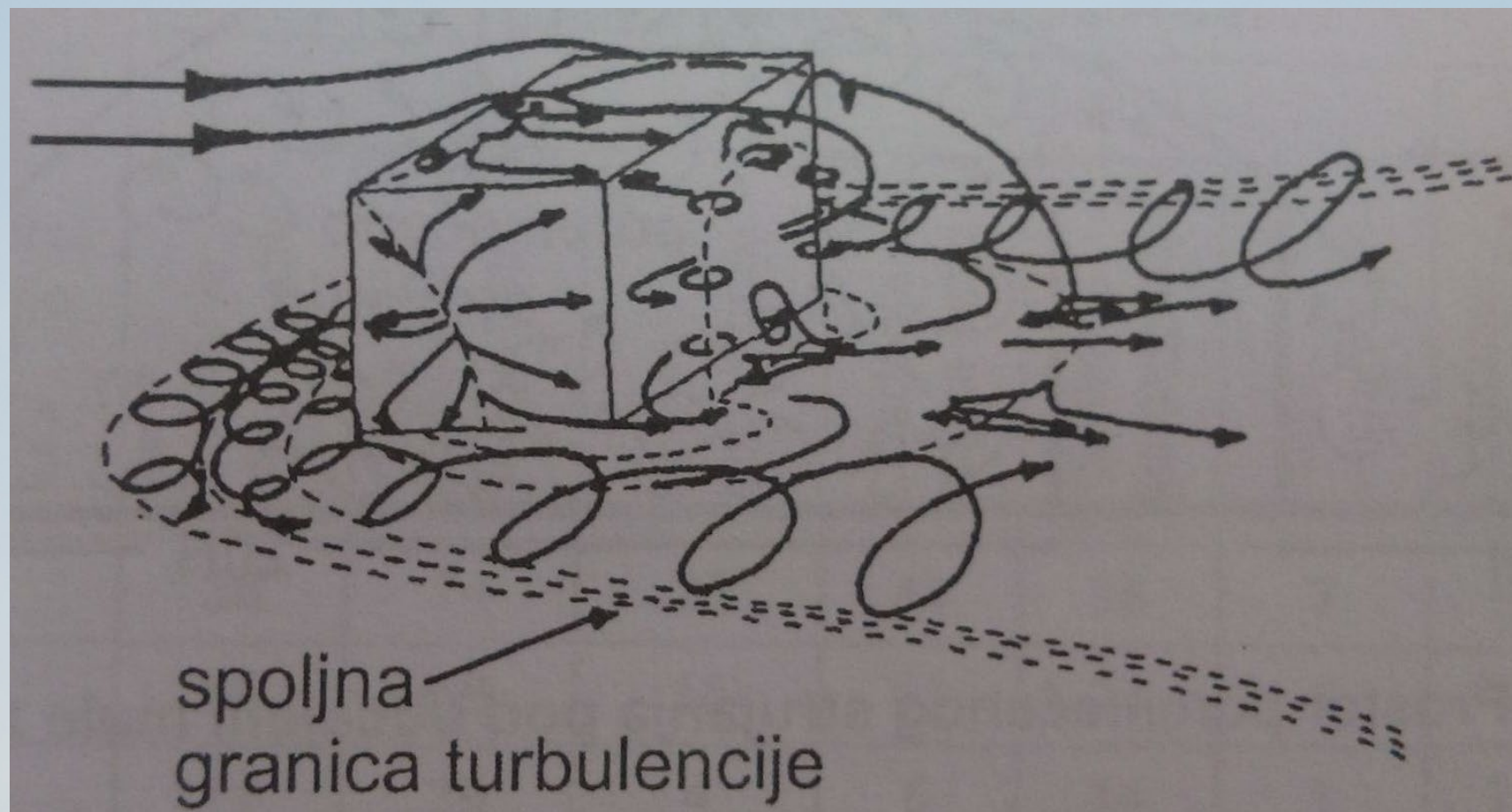
Merenje brzine vetra

- Brzina vetra se obično meri anemometrom sa poluloptastim čašicama.
- Anemometar se sastoji se od vertikalne osovine na kojoj se na vrhu nalaze tri poluloptaste čašice koje se okreću u smeru vetra.
- Na osnovu prikupljenih podataka o brzinama i pravcima vetrova izrađuju se dijagrami ruža vetrova za neku lokaciju



PREPREKE - objekti

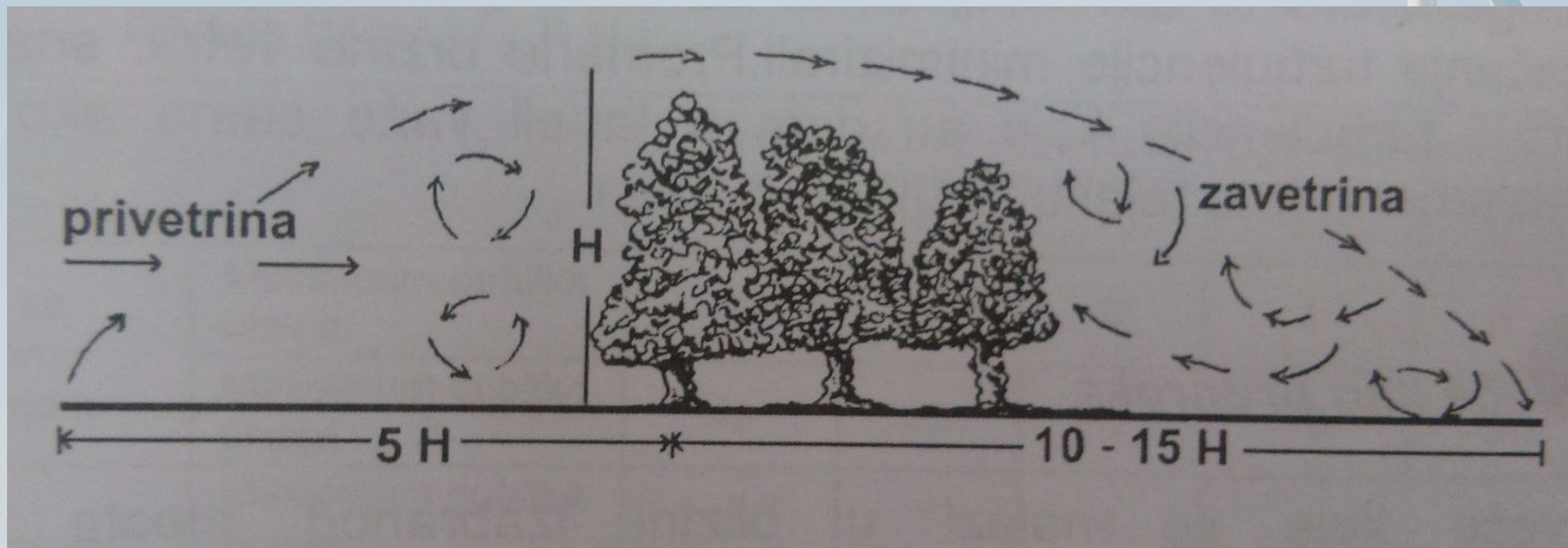
- Prepreke sprečavaju vazдушna strujanja, stvarajući vazdušno strujenje na zavetrinskoj strani prepreke.
- Zgrade kao prepreka u vazдушnom strujanju – Ako se u blizini mesta za postavljanje vetrogeneratora nalaze objekti oni će uticati na priliv energije vetra.



- Hrapavost terena je promenjiva, talasi oko zgrade se povećavaju s visinom. Vetar struji oko zgrade formirajući potkovicu (tačkasta linija)

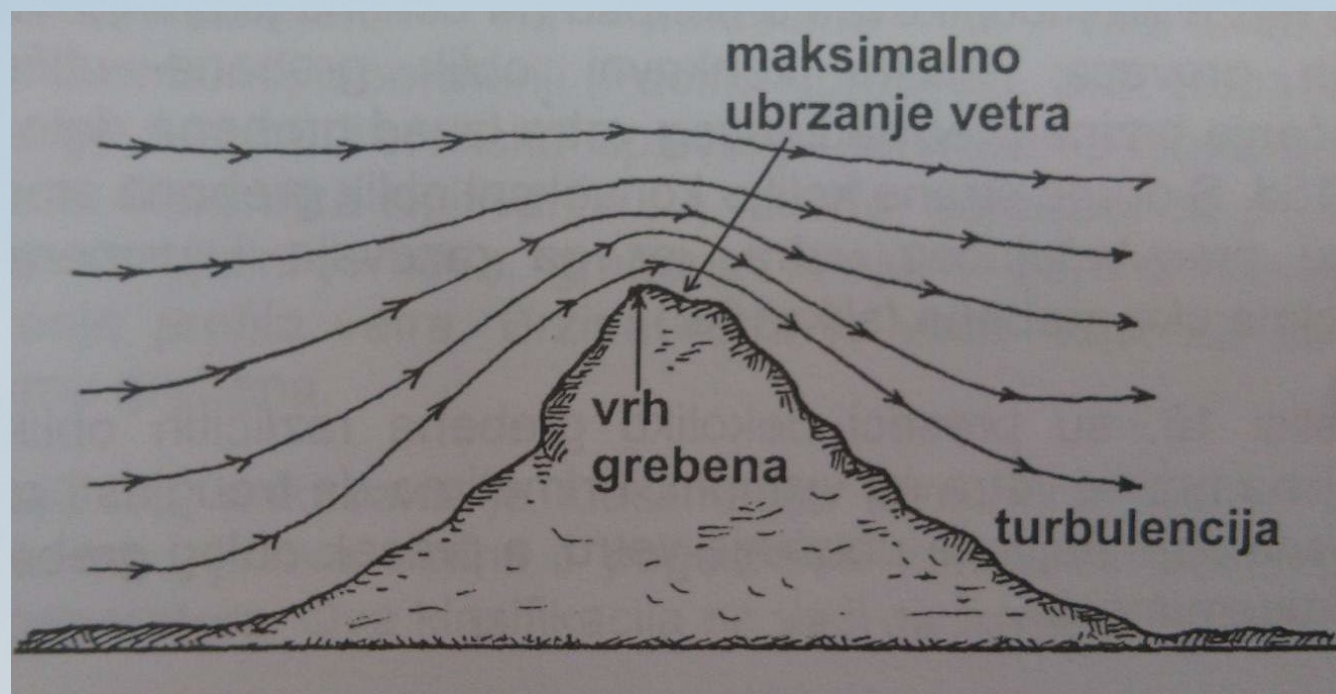
PREPREKE – zaštitini pojasevi

- Zaštitni pojasevi u vidu kompleksa šuma su velike prepreke za strujanje vazduha u lokalitetu budućeg vetrogeneratora.
- Potrebno je izabrati: mesto udaljeno od ulaznih i niskopnih strujanja vazduha, izbeći turbulentna strujanja u zavetrinskom delu, postaviti dovoljno visok stub, merenjima izabrati mesto sa najmanjom turbulencijom



IZBOR MESTA ZA POSTAVLJANJE VETROGENERATORA na visokom terenima

- Kod neravnih terena oblik zemljine površine utiče na vazдушna strujanja koja su u prizemnom sloju odmah iznad tla.
- Promena brzine vetra ukazuje da se brzina vetra povećava s visinom.
- Promena temperature vazduha utiče na promenu brzine vetra s visinom.



- Strujanje vazduha iznad preko grebena - Iznad vrha grebena strujnice su sabijene i na tom delu je brzina vetra veća nego iznad okolnog prostora



KARAKTERISTIČNI JAKI VETROVI U SRBIJI

- **Postojana i vremenska raspodela jakih vetrova** u Srbiji značajna je ne samo za potrebe izbora najpovoljnijeg mesta za vetrogeneratore već i za potrebe projektovanje, gradnje, održavanja...
- Jaki vetrovi na našim prostorima javljaju se u oblasti niskog vazdušnog pritiska, odnosno u oblastima ciklona i depresija. **Brzina vetra se naročito povećava kada u centralnom delu ciklona** dođe do jačeg pada vazdušnog pritiska, a istovremeno na periferiji ciklona vazdušni pritisak se znatno ne menja.
- Jaki vetrovi sa olujnim ili orkanskim brzinama koje uslovljavaju formiranje ciklona, javljaju se uglavnom u zimskom periodu (oktobar-april)
- U letnjem periodu olujni vetrovi u vezi su sa nastankom vremenskih nepogoda. Ove nepogode nastaju usled nestabilne vazdušne mase ili u zoni hladnog fronta. Nosioi nepogode, jakih pljuskovnih padavina, atmosferskih električnih pražnjenja ili nedosatatak električnih pražnjenja i jakog vetra su oblaci snažnog vertikalnog razvoja.

KARAKTERISTIČNI JAKI VETROVI U SRBIJI

- **Košava** – U severoistočnom delu naše zemlje poznata je košava kao jak vetar. U podunavlju i pomoravlju ima jugoistočni pravac i duva uglavnom u periodu oktobar-april. Najveći udari košave zabeleženi su u Južnom Banatu između Velikog Gradišta, Vršca i Beograda. Srednja brzina košave u proseku iznosi 10 m/s ili 36km/h. Pojedini udari dosežu 30m/s. Radiosondažna merenja u Beogradu pokazuju da najveću brzinu košava ima u sloju 200 do 300m iznad zemljine površine
- **Jugozapadni vetar** – U zapadnom Sredozemlju dođe do dubljeg razvoja ciklona onda iznad Balkanskog poluostrva jača jugozapadno ili južno visinsko strujanje.
- **Severozapadni vetar** – U istočnom delu Srbije, a posebno u dolini Morave, Timoka i Nišave, ima i severozapadni vetar. Najjače udare doseže oko Negotina i Dimitrovgrada.

EKONOMSKA ISPLATIVOST KORIŠĆENJA VETROGENERATORA U SRBIJI

Na osnovu dosadašnjih iskustava u gradnji vetrogeneratora snage preko 500kW, došlo se do orijentacione vrednosti investicija od oko 700 do 1000 € po instaliranom kW.

Troškove ugradnje vetrogeneratora su investicioni kao i troškovi kasnijeg održavanja. Investicioni troškovi se kreću od 75% do 90% ukupnih troškova.

Investicioni troškovi su troškovi izgradnje vetrogeneratora, uključujući troškove izgradnje pristupnih puteva, ukoliko je potrebno, i troškove priključivanja na elektroenergetski sistem.

Obično su lokacije sa povoljnim uslovima za gradnju farme vetrenjača udaljene od drumskih i energetskih magistrala i to povezivanje utiče na povećanje investicionih troškova. Povećavanjem brzine vetra, raste koeficijent korisnog dejstva što postavlja zahtev za podizanjem visokih stubova.

EKONOMSKA ISPLATIVOST KORIŠĆENJA VETROGENERATORA U SRBIJI

Takođe, energija iz vetrogeneratora se obično proizvodi bliže potrošačima **čime se smanjuju gubici u prenosu električne energije** i ovako dobijena energija ima povećanu konkurentnost.

Ako uzmemo jedan vetrogenerator snage 1MW on će na prosečnoj brzini vetra od 6m/s proizvoditi godišnje oko 2000MWh električne energije. To je dovoljno za podmirenje oko 500 prosečnih četveročlanih domaćinstava. Sa cenom od 0,095 evra/kWh, dolazimo do cifre od oko 200.000 evra za količinu proizvedenih kWh godišnje.

Tako dolazimo do računice da je isplativost ugradnje vetrogeneratora snage 1 MW, ako uzmemo u obzir da je prosečna brzina vetra oko 6 m/s, oko 5 godina. Naravno, period isplativosti ugradnje vetrogeneratora na lokaciji gde je prosečna brzina vetra preko 6 m/s je mnogo kraći.

Ukupna emisija klimatski štetnih gasova iz elektrana (CO₂ -ekvivalent, gram / kWh)

Tip elektrana	Direktna emisija	Indirektna emisija	Ukupna emisija
Velike hidroelektrane	0	10-20	10-20
Male hidroelektrane	0	15-20	15-20
Vetroelektrana 600 kW	0	40	40
Vetroelektrana 1,5 MW	0	50	50
Elektrana na biomasu 700 kW	0	50	50
Elektrana na biomasu 11,5 MW	0	45	45
Velika fotoelektrična elektrana	0	180	180
Mala fotoelektrična elektrana	0	220	220
Konv. termoelektrane na gas	340	80	420
Konv. termoelektrane na kam. ugalj	820	100	920



Troškovi malih izvora energije

Tip izvora	Veličina (MW)	Investicije (Eura/kW)	Troškovi pogona (Eura/kWh)
Vetroelektrane	15	900-1300	0,04-0,09
Off-shore Vetr.	100	1500-2000	0,05-0,12
Kombi.-e	40	550-850	0,04-0,06
Hidroelektrane - mali pad	5	900-1000	0,02-0,03
Kogeneracija	5	800-850	0,05-0,06
Fotonaponski sistem	5	6000-10000	0,75-1,00
Gorive ćelije	5	1100-1600	0,08-0,10



Video

- https://www.youtube.com/watch?v=qSWm_nprfqE



THINK

GREEN

