



Program: ERASMUS-EDU-2022-CBHE-STRAND-2
Project number: 101082860



Funded by
the European Union

Energija vjetra kao obnovljivi izvor energije

Edin Šunje
„Džemal Bijedić“ University in Mostar
Faculty of Mechanical Engineering

Obnovljivi izvori energije 26.03.2025.

"Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union. Neither the European Union nor the granting authority can be."

Partnership for Promotion and Popularization of Electrical Mobility through Transformation and Modernization of WB HEIs Study Programs/PELMOB

Call: ERASMUS-EDU-2022-CBHE-STRAND-2

Project Number: 101082860

Proračun snage vjetroturbina

- **SCENARIO**

- Vjetroturbine rade na principu pretvorbe kinetičke energije vjetra u kinetičku energiju turbine a zatim preko generatora u električnu energiju koja se dalje putem mreže šalje do potrošača.
- Ukupna količina energije koju možemo konvertovati u električnu energiju zavisi od brzine vjetra i prečnika turbine. Kada projektujemo vjetroelektranu važno je poznavati očekivanu snagu i energiju na izlazu svake od vjetroturbina kako bi smo izračunali ekonomsku opravdanost.

- **POSTAVKA PROBLEMA**

- Kao što već znamo od ključne je ekonomske važnosti poznavati snagu a time i proizvedenu energiju kod različitog tipa turbina u različitim uslovima. U ovom primjeru ćemo izračunati rotacionu kinetičku energiju na vjetroturbini pri određenoj brzini vjetra. Ovo je minimalna brzina vjetra pri kojoj vjetroturbina proizvodi nominalnu snagu.

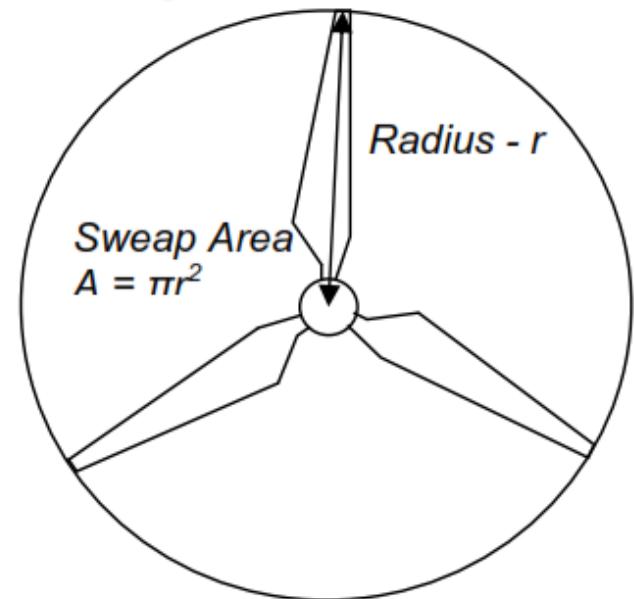


Proračun snage vjetroturbina

MATEMATIČKI MODEL

- Definicija varijabli korištenih u modelu

- | | |
|------------------------------------|---------------------------------------|
| • E = Kinetic Energy (J) | ρ = Density (kg/m ³) |
| • m = Mass (kg) | A = Swept Area (m ²) |
| • v = Wind Speed (m/s) | C_p = Power Coefficient |
| • P = Power (W) | r = Radius (m) |
| • dm/dt = Mass flow rate (kg/s) | x = distance (m) |
| • dE/dt = Energy Flow Rate (J/s) | t = time (s) |



Proračun snage vjetroturbina

MATEMATIČKI MODEL

- Pri konstantnom ubrzaju, kinetička energija posmatranog objekta mase **m** i brzine **v** jednaka je utrošenom radu **W** pri pomjeranju posmatranog tijela iz stanja mirovanja na neku distancu **s** pri djelovanju sile **F**

$$E = W = Fs$$

II Newtonov zakon:

$$F = ma$$

Iz čega slijedi

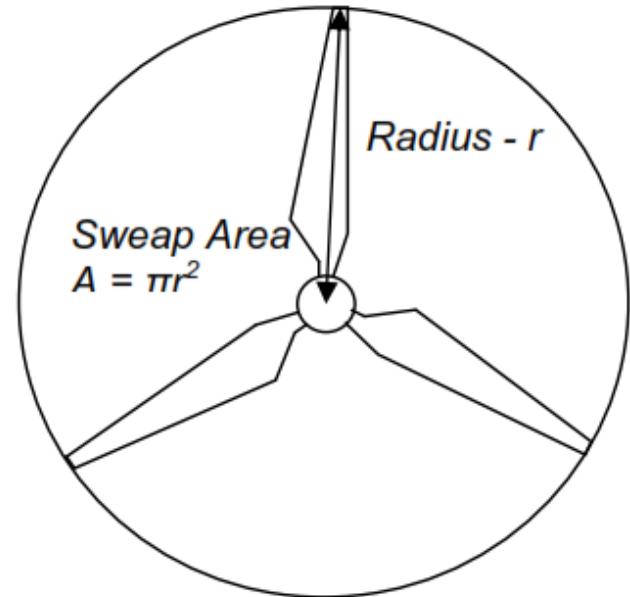
$$E = mas$$

Korištenjem relacije za jednakoubrzano kretanje

$$v^2 = u^2 + 2as$$

Iz čega dobijamo

$$a = \frac{(v^2 - u^2)}{2s}$$



Proračun snage vjetroturbina

MATEMATIČKI MODEL

Kako je početna brzina tijela jednaka nuli $u=0$, dobijamo

$$a = \frac{v^2}{2s}$$

Uvrštavanjem vrijednosti a u jednačinu (1) dobijamo izraz za kinetičku energiju tijela koje se kreće

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \dots (2)$$

Snaga vjetra je definisana brzinom promjene energije

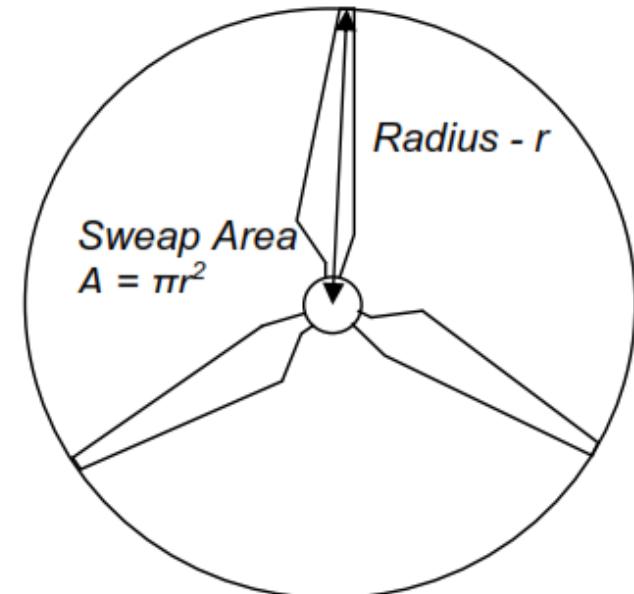
$$P = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2}v^2 \frac{dm}{dt} \dots (3)$$

Maseni protok je određen izrazom

$$\frac{dm}{dt} = \rho A \frac{dx}{dt} \quad ; \quad dx/dt=v$$

Slijedi da je

$$\frac{dm}{dt} = \rho Av$$



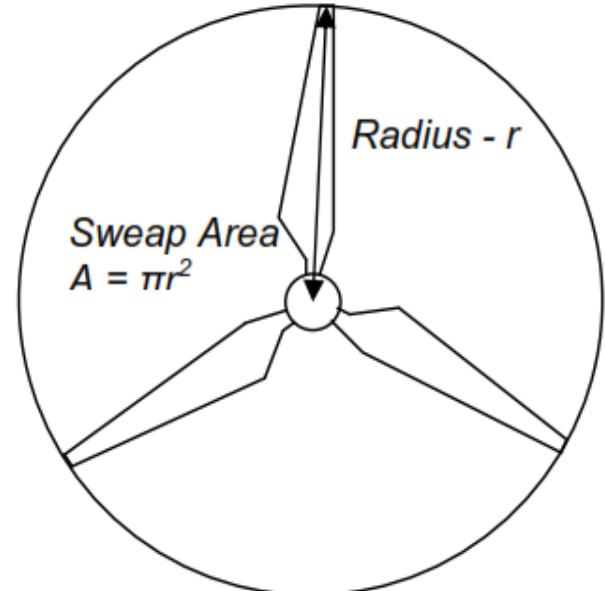
Proračun snage vjetroturbina

MATEMATIČKI MODEL

Na osnovu jednačine (3) snaga vjetra se definiše kao

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \dots (4)$$

- Njemački fizičar Albert Betz je zaključio 1919. da ni jedna vjetroturbina ne može konvertovati više od **16/27 (59.3%)** kinetičke energije vjetra u mehaničku energiju rotacije rotora.
 - Betz Limit ili Betzov zakon
 - Teoretski maximalni koeficijent iskoristivosti snage vjetra bilo kojeg tipa vjetroturbine iznosi 0.59
 - Nazivamo ga koeficijentom snage
- $C_{p_{max}} = 0.59$
- *Vjetroturbine ne mogu raditi na maximalnom limitu*



Proračun snage vjetroturbina

Vrijednost koeficijenta C_p je jedinstvena za svaki tip turbine, također zavisi od brzine vjetra pri kojoj turbina radi.

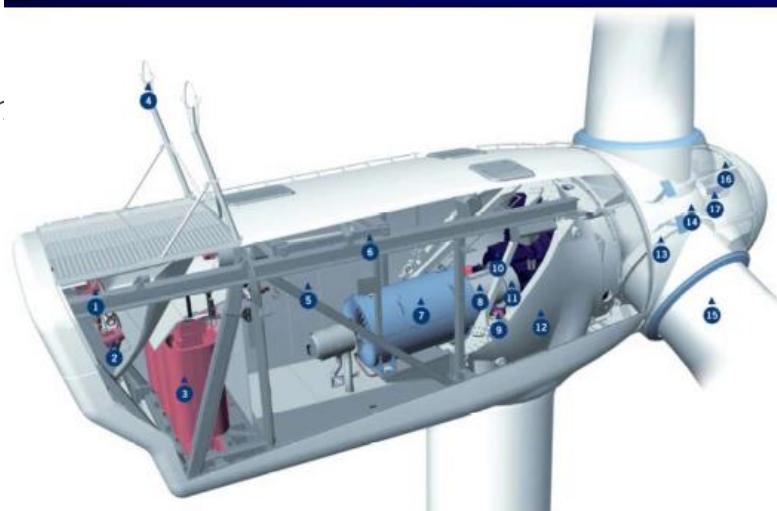
*Kada uzmemo u obzir i ostale zahtjeve kao što su čvrstoća i radni vijek onda vrijednost koeficijenta C_p ide značano ispod Betzovog limita i kreće se od **0.35-0.45** čak i kod najbolje dizajniranih vjetroturbina.*

Ako pri tome uzmemo u obzir i ostale komponente Sistema, gubitke na multiplikatoru, ležajevima, generatoru stvarna snaga vjetra koja se konvertuje u upotrebljivu energiju ne prelazi 10-30% vrijednosti snage vjetra.

Iz navedenog je očigledno da koeficijent C_p moramo uzeti u obzir i dodati ga u izrazu (4) kako bi smo dobili izraz za korisnu snagu vjetra i data je izrazom (5)

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \dots (4)$$

$$P_{\text{avail}} = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p \dots (5)$$

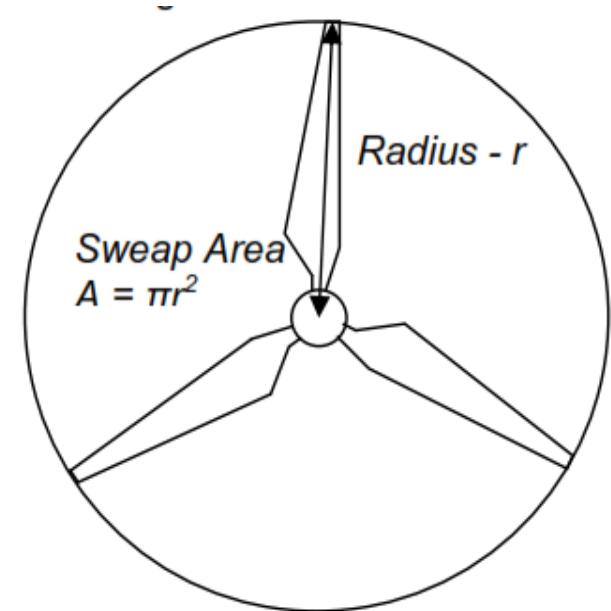
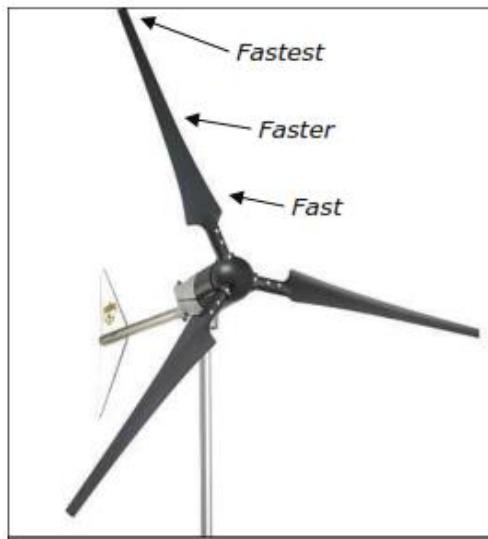


Proračun snage vjetroturbina

Površina rotora (brisuća površina) se može izracunati na osnovu izraza za površinu kruga

$$A = \pi r^2 \dots (6)$$

gdje je radijus jednak dužini lopatice



PRIMJER

ULAZNI PODACI

Dužina lopatice, $l=52$ m

Brzina vjetra, $v=12$ m/s

Gustoća zraka, $\rho=1.23$ kg/m³

Koeficijent snage $C_p=0.4$

Izračunati predatu energiju vjetra rotoru vjetroturbine!



PRIMJER

RJEŠENJE

Dužina lopatice, $l=52 \text{ m}$

Brzina vjetra, $v=12 \text{ m/s}$

Gustoća zraka, $\rho = 1.23 \text{ kg/m}^3$

Koeficijent snage $C_p=0.4$

$$A = \pi r^2 \dots (6)$$

Uvrštavanjem vrijednosti u jednačinu (6), pri čemu je $l=r$;

Uvrštavanjem vrijednosti u jednačinu (6),

$$\begin{aligned} A &= \pi r^2 \\ &= \pi \times 52^2 \\ &= 8495 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{\text{avail}} &= \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p \\ &= \frac{1}{2} \times 1.23 \times 8495 \times 12^3 \times 0.4 \\ &= 3.6 \text{ MW} \end{aligned}$$

ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

Dobijenu vrijednost u predhodnom zadatku obično definišu konstruktori vjetroturbina

Važno je razumjeti vezu između datih faktora i korititi izvedenu jednačinu za proračun snage turbine pri brzinama vjetra koje se razlikuju od nominalne brzine vjetra.

Važno je razumjeti ponašanje vjetroturbine pri različitim brzinama vjetra kako bismo mogli izračunati gubitke (€) kada vjetroturbine ne proizvodi električnu energiju.

Važno je izračunati koliko će se energije proizvesti u smislu tržista energije. Obično se energija prije proda nego li se proizvede

Pouzdani proračuni proizvodnje energije su bitni za balansiranje energije na tržitu kao i za previđanje prihoda za investitora.

VJEŽBA-1

- 1.** Ponoviti proračun iz prethodnog primjera za različite vrijednosti brzine vjetra i prikazati dijagram proizvedene snage za date brzine vjetra
- 2.** Koja je veza između brzine vjetra v i snage P ?

Napomena: u ovoj vježbi prepostavljamo da je vrijednost koeficijenta snage C_p konstantna. Poznato nam je da je u stvarnosti C_p funkcija brzine vjetra što će detaljnije biti obrađeno u vježbi-3

VJEŽBA-2

1. Morske turbine su konstruisane koristeći isti princip kao i vjetroturbine. Međutim, one se koriste u različitim uslovima pri čemu se varijable date jednačinom (5) blago razlikuju. Kako morske turbine pokreće voda a ne zrak potrebno je uzeti u specifičnu gustoću vode umjesto zraka

$$\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$$

2. Prosječni koeficijent snage morskih turbina se razlikuje od koeficijenta snage vjetroturbina. do danas, tehnologija nije napredovala do te mjere kako bi koeficijent iskoristivosti morskih turbina bio jednak koeficijentu snage vjetroturbina. Teoretski maksimum je definisan Betzovim zakonom 0.59
3. U primjeru će se koristiti vrijednost koeficijenta snage $C_{pm}=0.35$

Na osnovu datih informacija, modifikovati jednačinu (5) uvrštavajući varijable koje se odnose na morske turbine te izračunati dužinu lopatice koja je potrebna da bi se proizvela ista snaga koju proizvodi vjetroturbina u prethodnom primjeru. Pretpostavimo da je vrzina $v=2.5 \text{ m/s}$, što je najčešća vrijednost brzine 'plimnog vala'.

VJEŽBA-3

Koeficijent snage C_p nije konstantna, kao što je ranije i naglašeno. Njegova vrijednost se mijenja sa omjerom brzine vrha lopatice (tip speed ratio). Omjer brzine vrha lopatice se definiše kao:

$$\lambda = \text{brzina vrha lopatice} / \text{brzina vjetra}$$

Brzina vrha lopatice može se izračunati kao:

$$\text{brzina vrha lopatice} = [\text{ugaona brzina(rpm)} \times \pi \times D] / 60;$$

gdje je D -prečnik rotora

Data je ugaona brzina turbine 15rpm na osnovu gornje dvije jednačine izračunati λ zatim popuniti tabelu datu na narednom slideu. Zatim očitati vrijednosti C_p koristeći dati dijagram. Očitane vrijednost C_p koristiti kako bi izračunali snagu korištenjem jednačine (5).

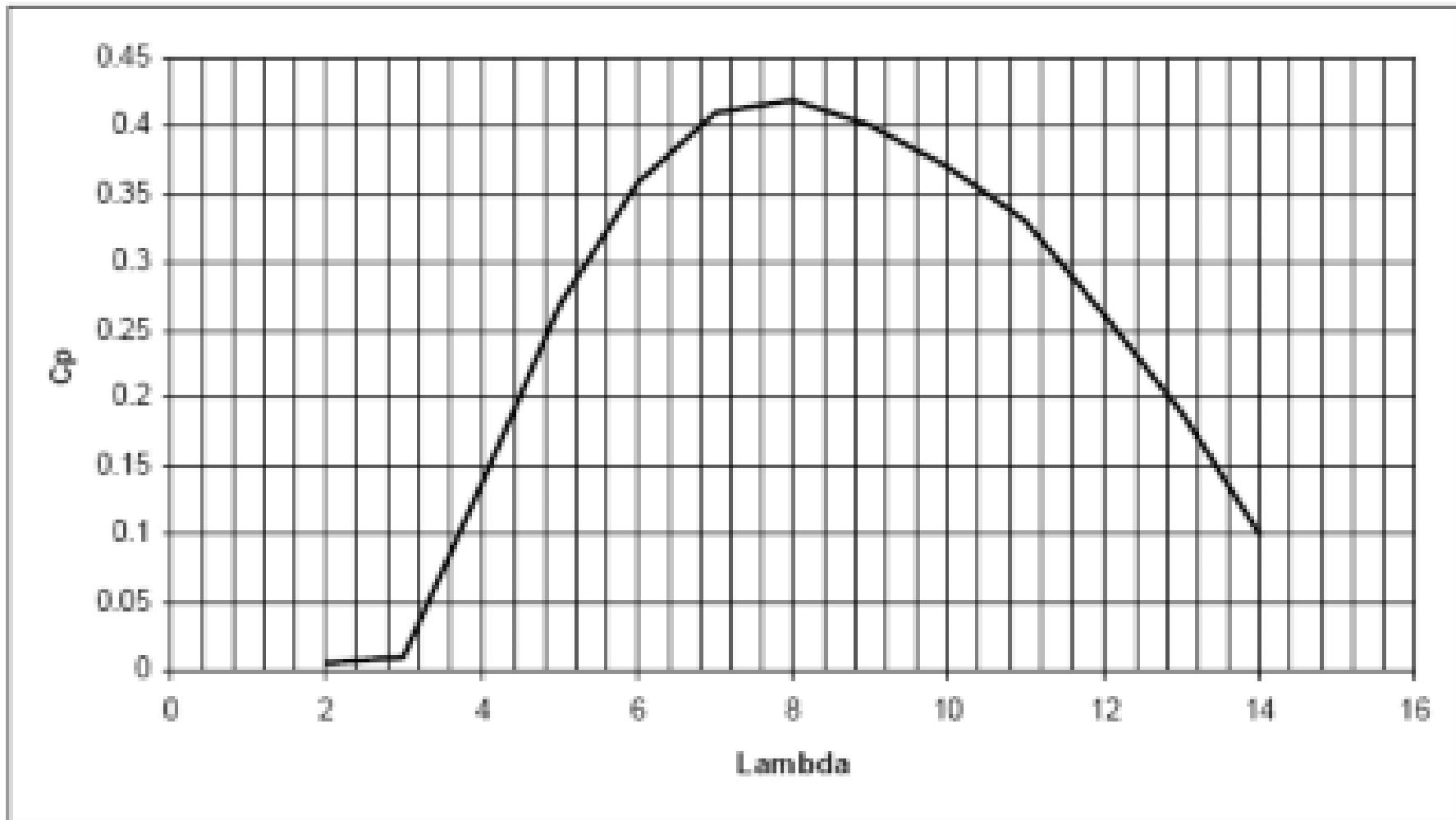
Konačno, izračunajte energiju na osnovu jednačine:

$$\text{Energija} = \text{Snaga} \times \text{Vrijeme}$$

Napomena: Čelije prekrižene u tabeli se odnose na vrijednosti brzine vjetra pri kojima vjetroturbina ne proizvodi električnu energiju iz razloga što su vrijednosti ili niske ili visoke.

VJEŽBA-3

WIND SPEED (m/s)	TIME (HOURS)	λ VALUE	C_p VALUE	POWER (kW)	ENERGY (kWh)
1	531				
3	1407				
5	1831				
7	1769				
9	1386				
11	913				
13	524				
15	249				
17	105				
19	39				
21	12				
23	3				
25	1				
27	0				
TOTAL					



BRZINA VRHA LOPATICE

Ako rotor vjetroturbine rotira suviše sporo, većina vjetra će proći ravno kroz razmak između lopatica, pri čemu se ne preda dovoljno snage

Ali ako se rotor okreće prebrzo, lopatice će se ponašati se kao čvrsta prepreka vjetru.

Također, lopatice rotora stvaraju turbulencije dok se okreću kroz zrak. Ako sljedeća lopatica stigne prebrzo, pogodit će turbulentni zrak. Dakle, ponekad je zapravo bolje smanjiti brzinu lopatica!





Program: ERASMUS-EDU-2022-CBHE-STRAND-2
Project number: 101082860



Funded by
the European Union

THANK YOU FOR YOUR ATTENTION!