

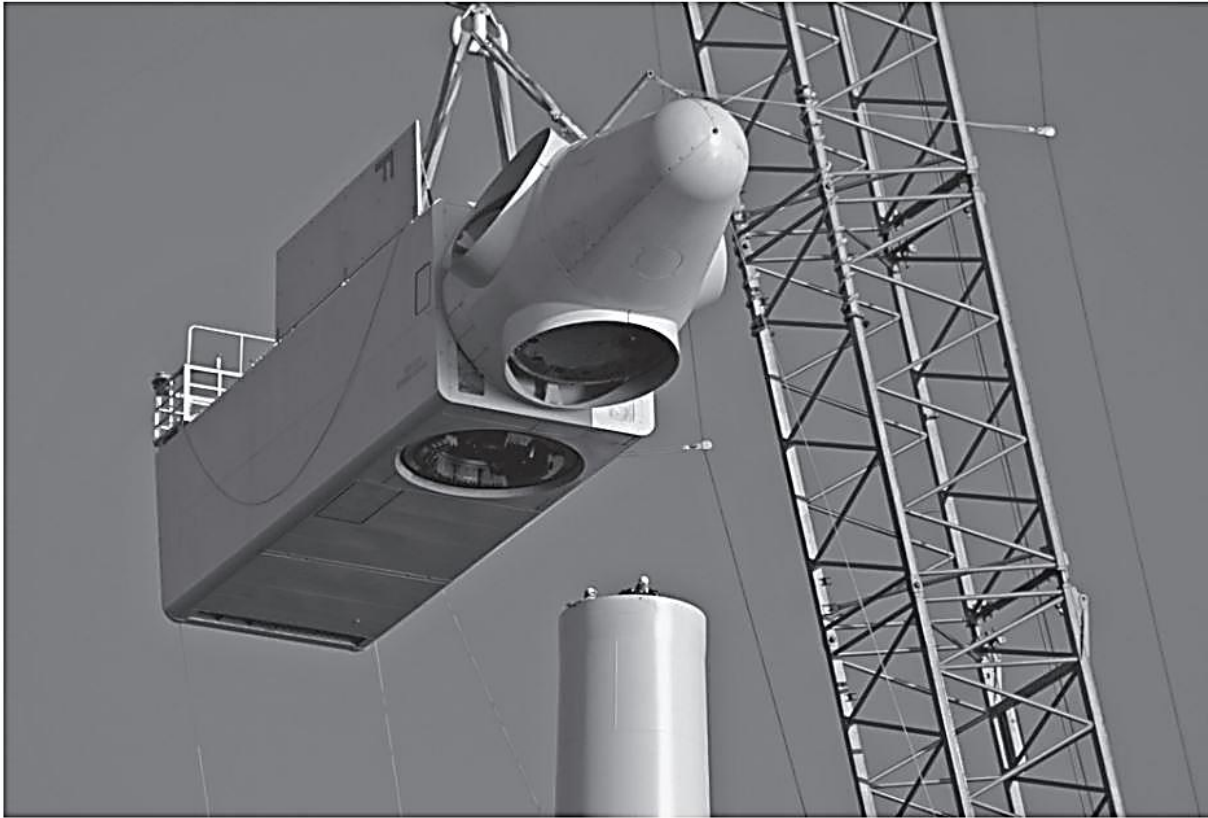
بسم الله الرحمن الرحيم

توربو ماشین ها

محمد صادق کریمی



گروه تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شریف

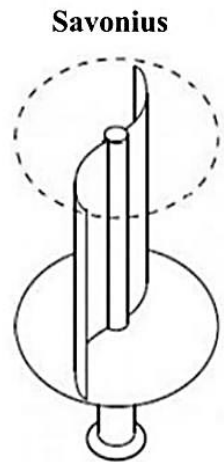
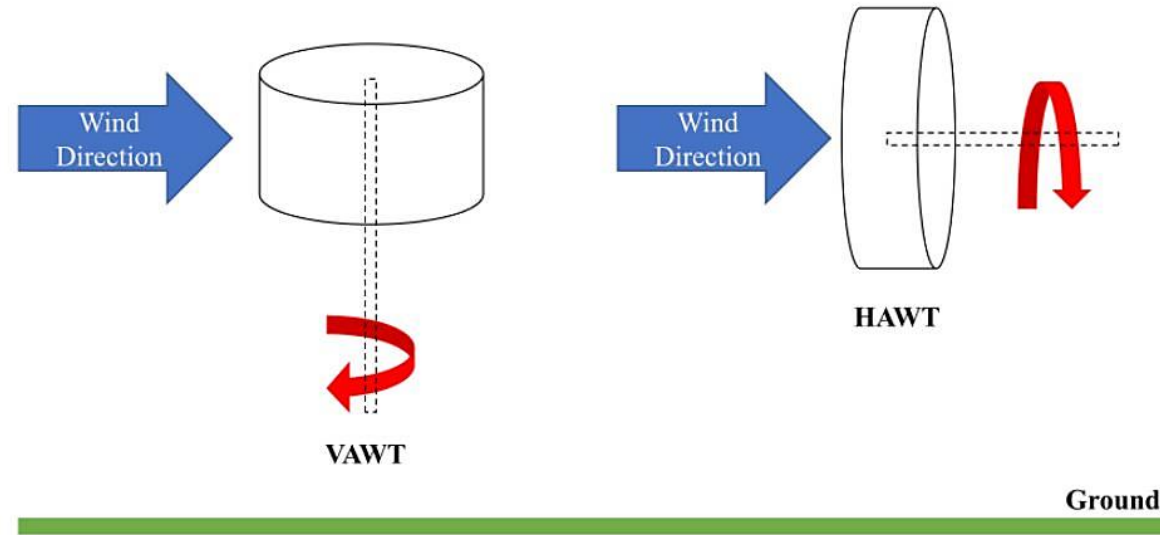


Rhyl Flats Offshore Wind Farm consists of 25×3.6 MW Siemens wind turbines.
Hub height – 80 m above mean sea level (MSL).
Height to blade tip – 134 m above MSL.

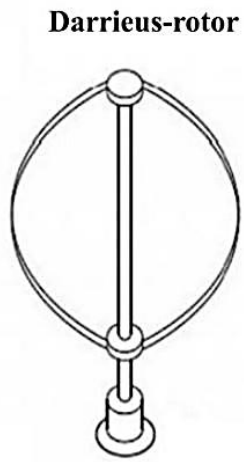




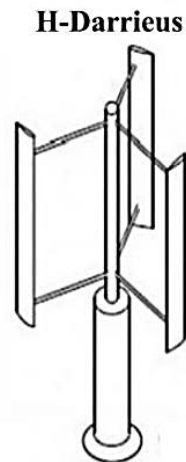
انواع توربین باد



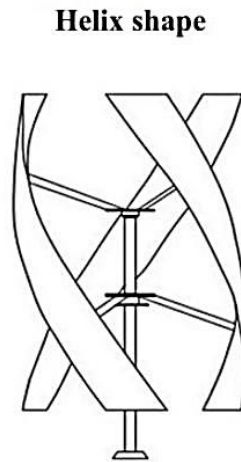
Savonius



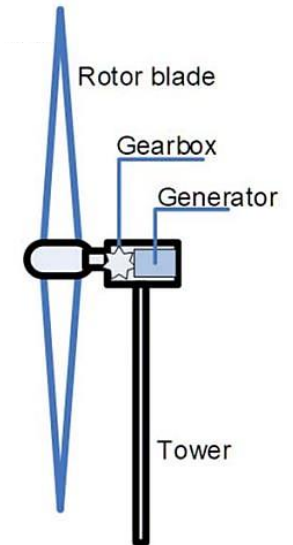
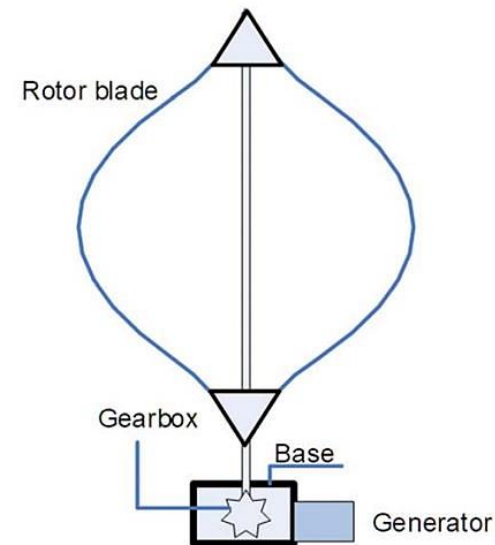
Darrieus-rotor

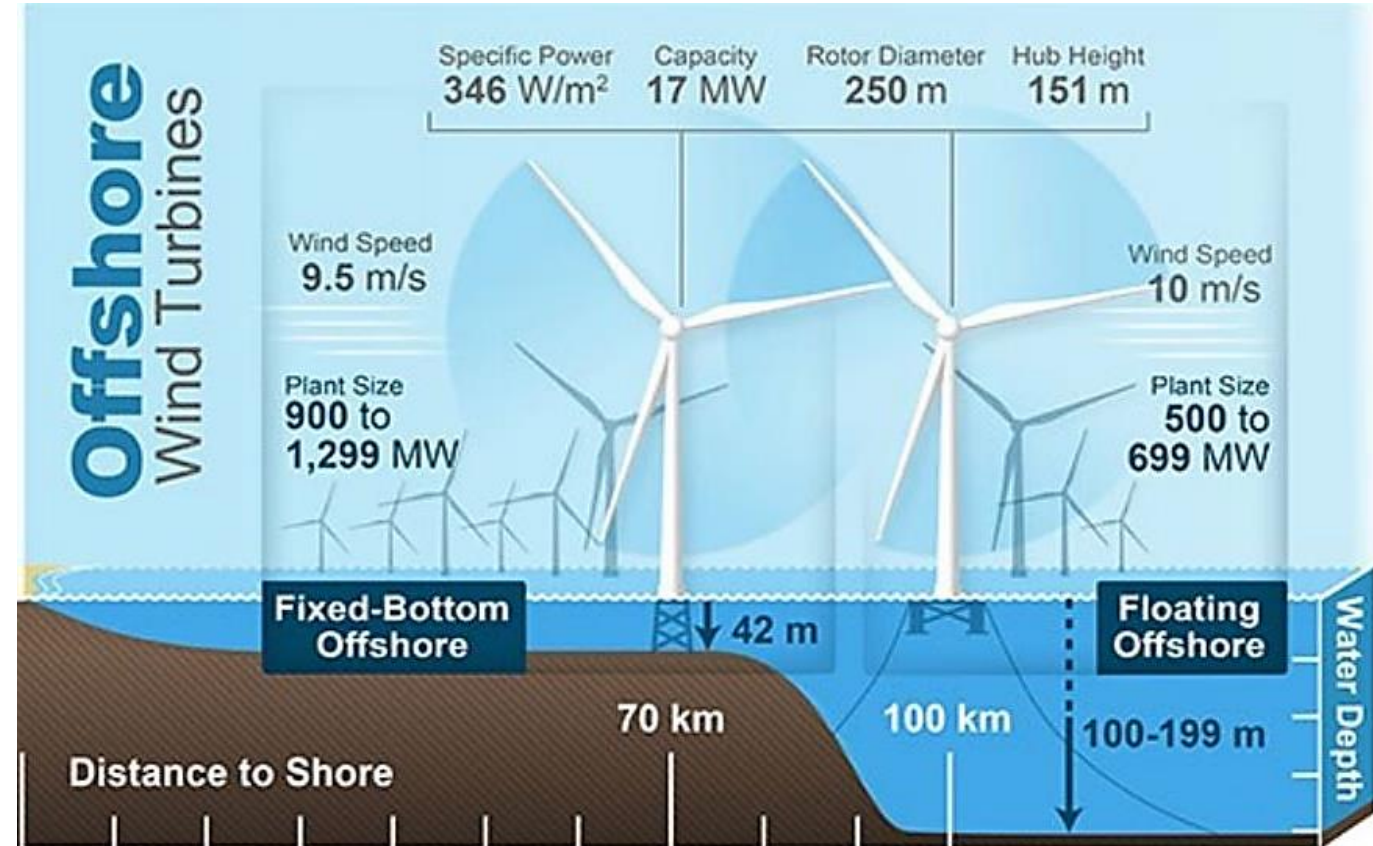


H-Darrieus



Helix shape





R. Wiser et al., "Expert elicitation survey predicts 37% to 49% declines in wind energy costs by 2050," Nat. Energy, vol. 6, no. 5, pp. 555–565, May 2021, doi: 10.1038/s41560-021- 00810-z.



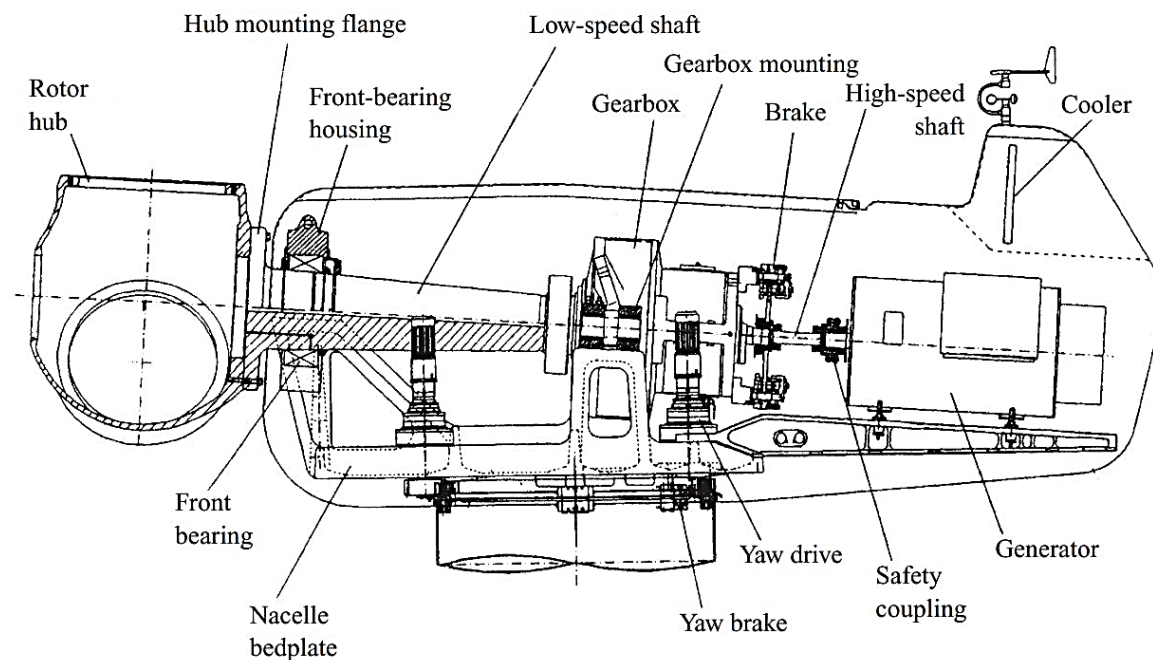
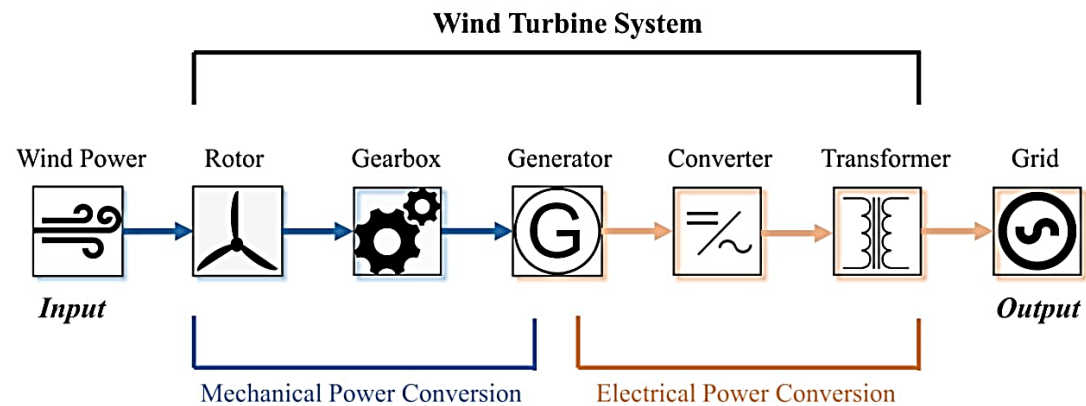
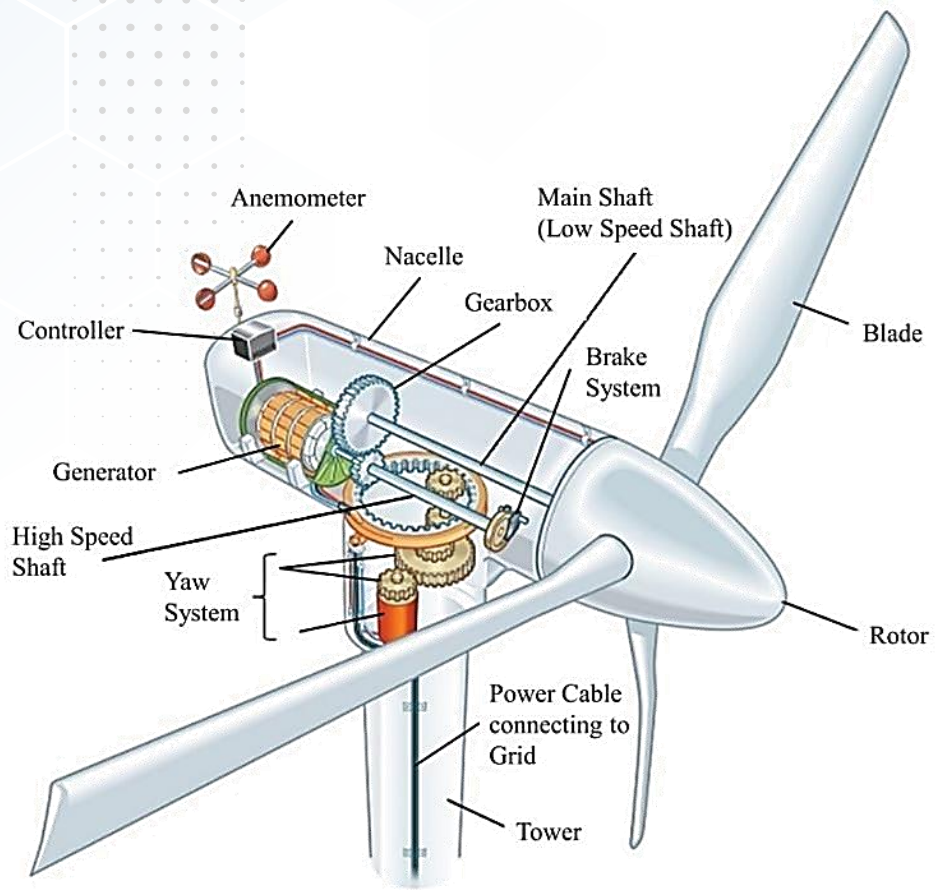
مقایسه انواع توربین باد محور افقی



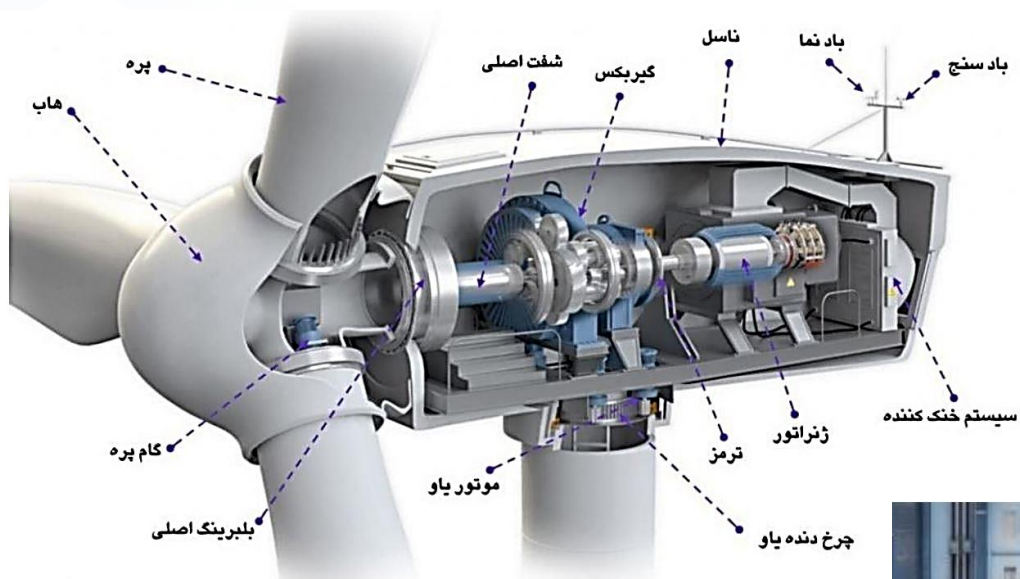
Term	Onshore wind turbines	Offshore wind turbines
Cost	Lower	Higher
Efficient	Lower	Higher
Power generation	Less	More
Installation and maintenance	Easy, quick	Hard, expensive
Wind condition	Various, no wind or intermittent	High wind speed, persistent
Installation site	Geographic restrictions	More Space to construct

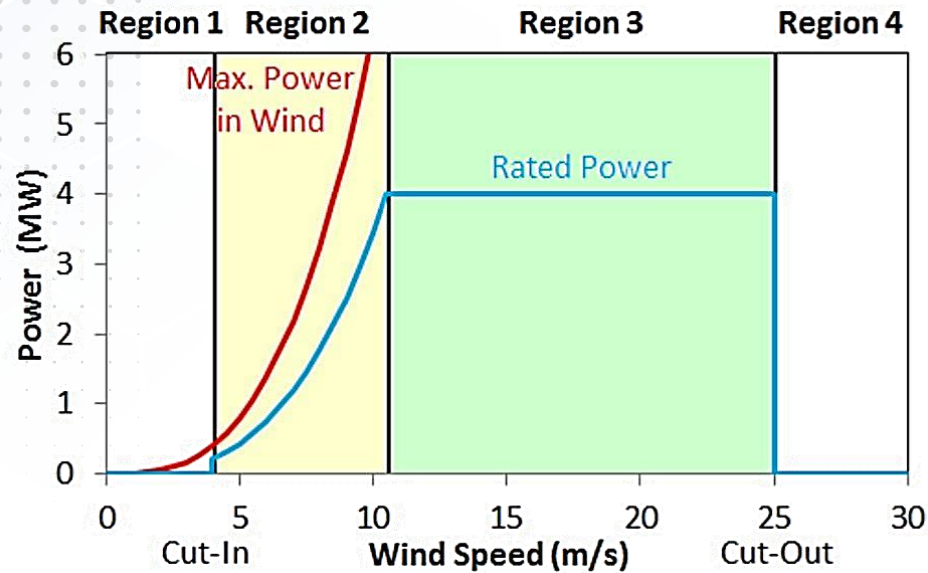


اجزای توربین باد

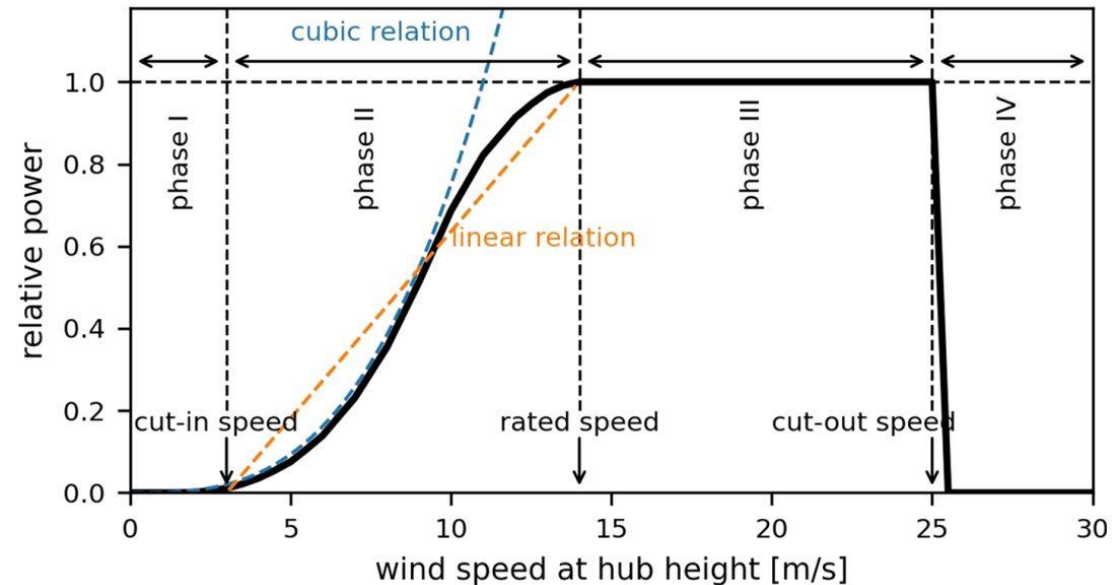


اجزای توربین باد





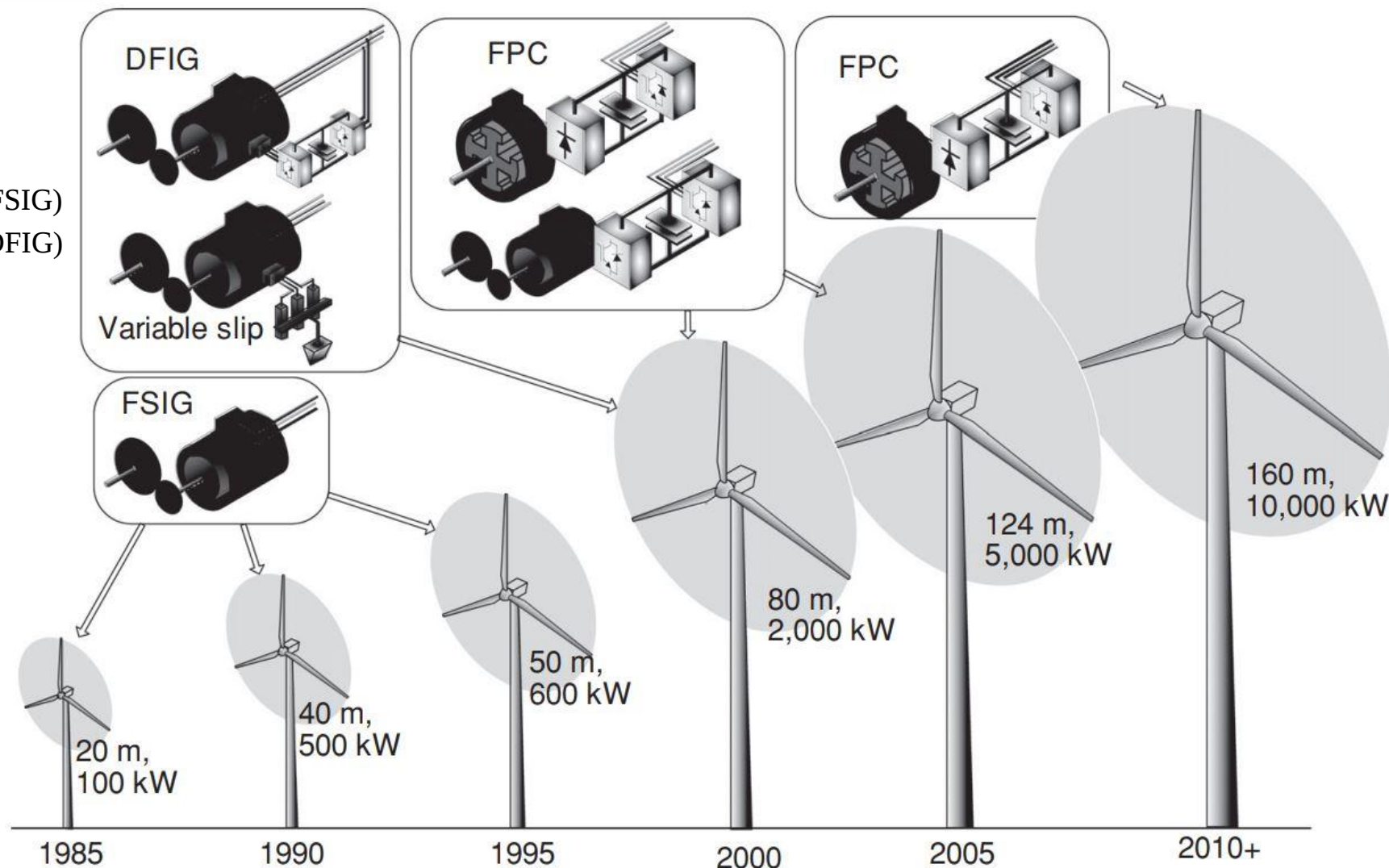
Cooperman, A. and Martinez, M., 2015. Load monitoring for active control of wind turbines. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 41, pp.189-201.



Li, Y., Janik, P. and Schwarz, H., 2024. Aggregated wind power characteristic curves and artificial intelligence for the regional wind power infeed estimation. Electrical Engineering, 106(1), pp.655-671.



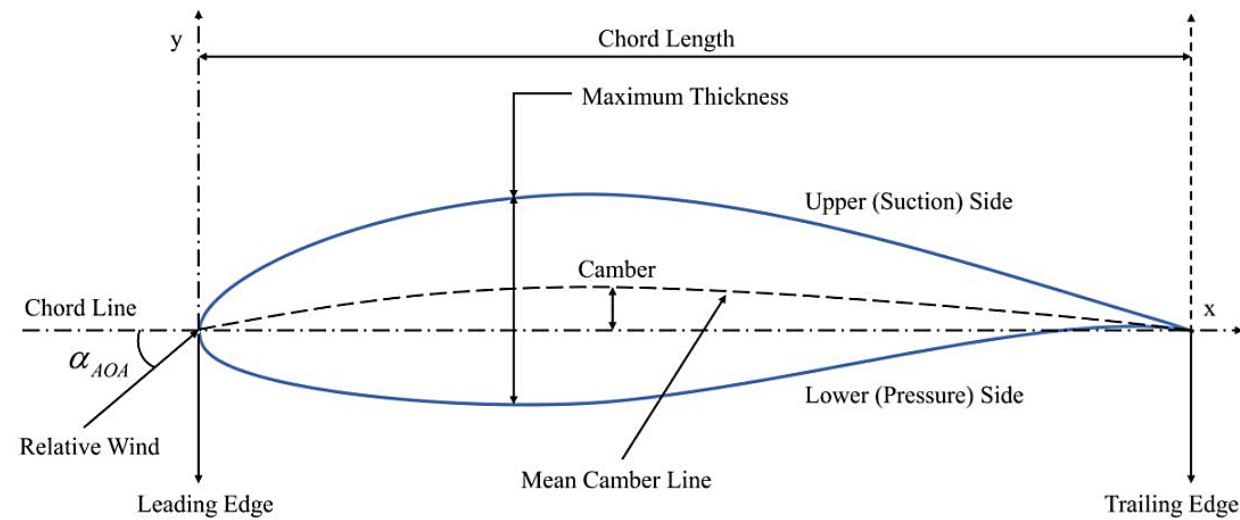
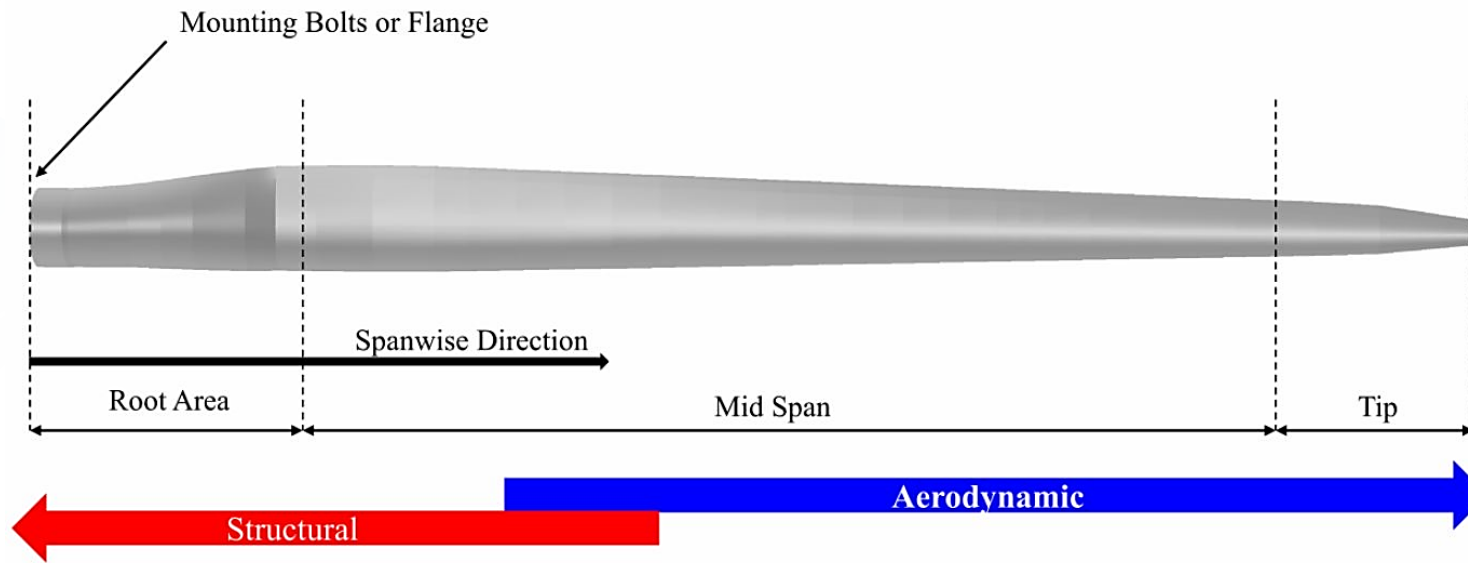
رند تکاملی ژنراتورهای توربین باد محور افقی



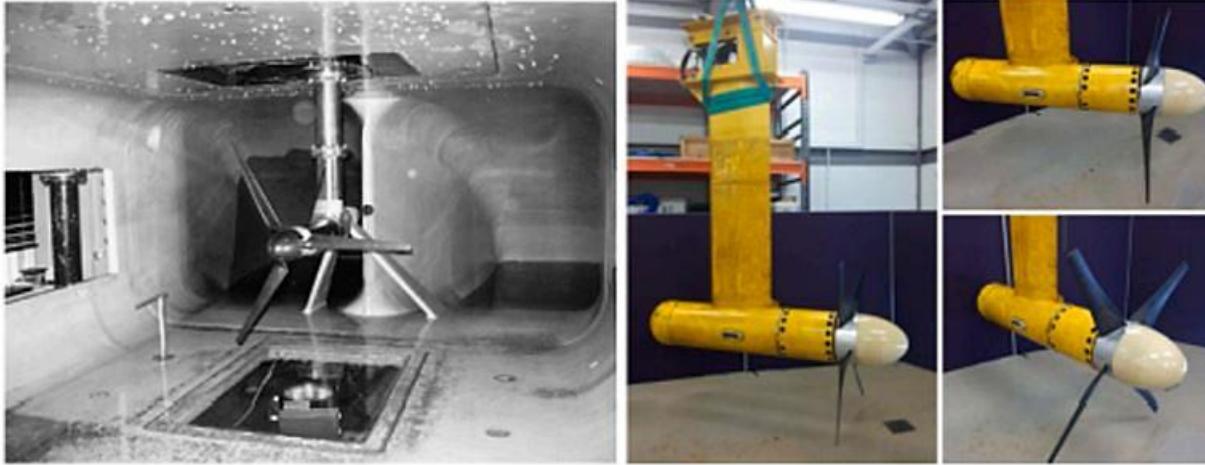
Fixed Speed Induction Generators (FSIG)
 Doubly-Fed Induction Generators (DFIG)
 Full Power Conversion (FPC)



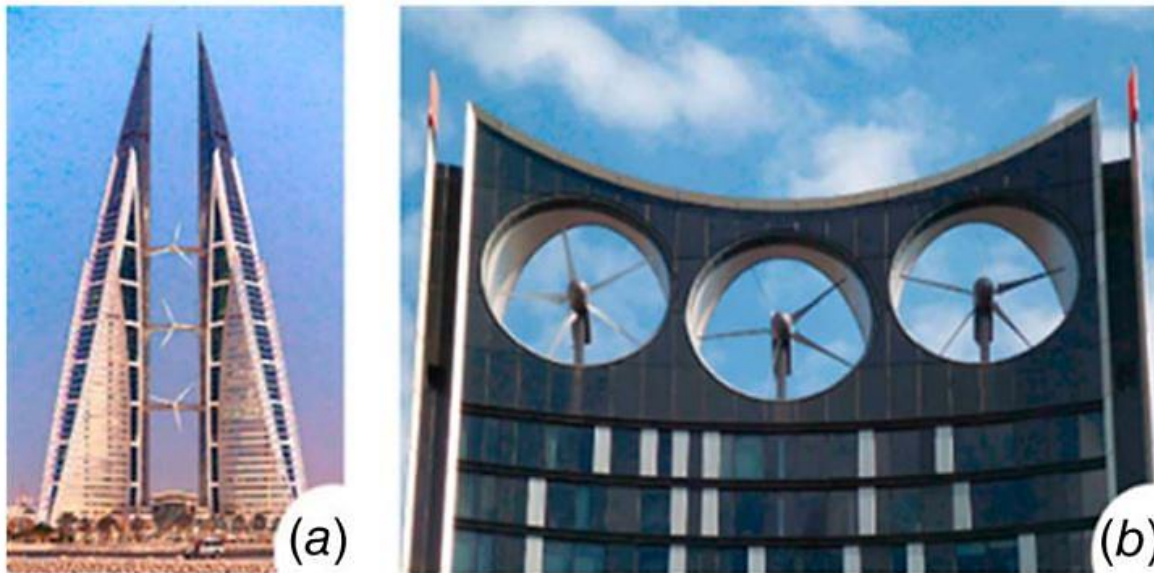
پره توربین باد محور افقی



انواع دیگر توربین محور افقی مورد استفاده



توربین‌های جریان جزر و مدی محور افقی



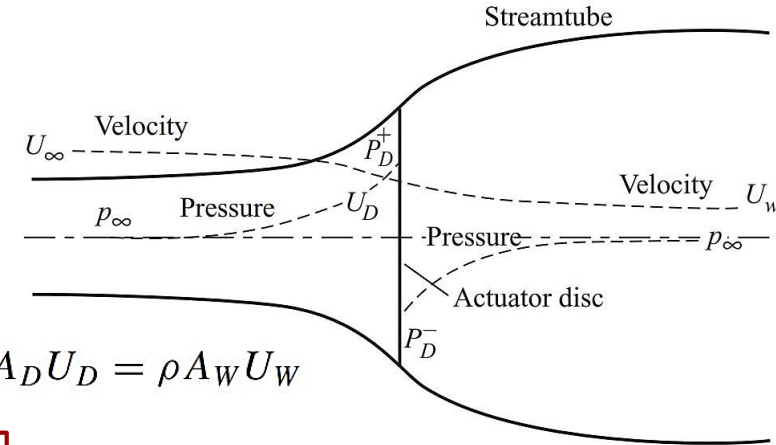
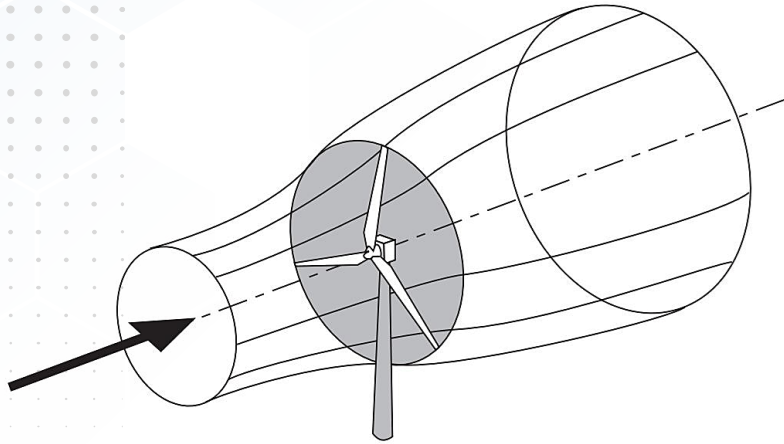
توربین‌های محور افقی مورد استفاده در ساختمان‌ها

توربین هوای رم





نظریه دیسک



$$\rho A_{\infty} U_{\infty} = \rho A_D U_D = \rho A_W U_W$$

$$U_D = U_{\infty}(1 - a)$$

$$\text{Rate of change of momentum} = (U_{\infty} - U_W) \rho A_D U_D$$

$$(p_D^+ - p_D^-) A_D = (U_{\infty} - U_W) \rho A_D U_{\infty} (1 - a)$$

$$\frac{1}{2} \rho U^2 + p + \rho g h = \text{const}$$

$$\frac{1}{2} \rho_{\infty} U_{\infty}^2 + p_{\infty} + \rho_{\infty} g h_{\infty} = \frac{1}{2} \rho_D U_D^2 + p_D^+ + \rho_D g h_D$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2 + p_{\infty} = \frac{1}{2} \rho U_D^2 + p_D^+ \\ \frac{1}{2} \rho U_W^2 + p_{\infty} = \frac{1}{2} \rho U_D^2 + p_D^- \end{array} \right. \quad \ominus$$

$$(p_D^+ - p_D^-) = \frac{1}{2} \rho (U_{\infty}^2 - U_W^2)$$

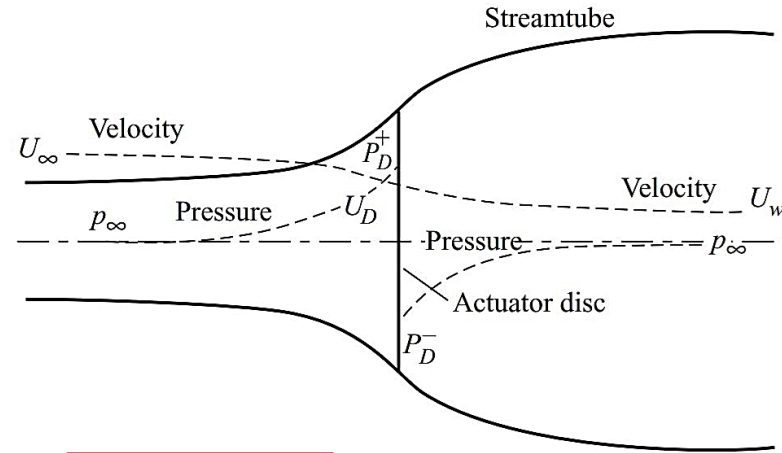
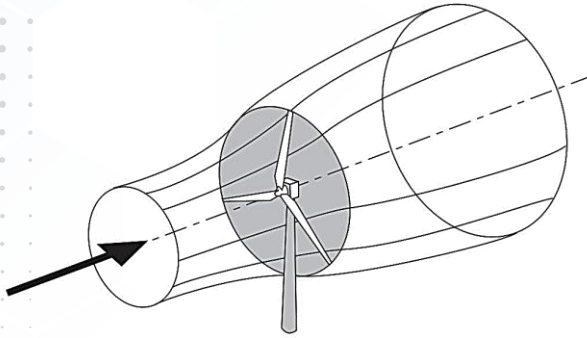
$$\frac{1}{2} \rho (U_{\infty}^2 - U_W^2) A_D = (U_{\infty} - U_W) \rho A_D U_{\infty} (1 - a)$$

$$U_W = (1 - 2a) U_{\infty}$$





نظریه دیسک

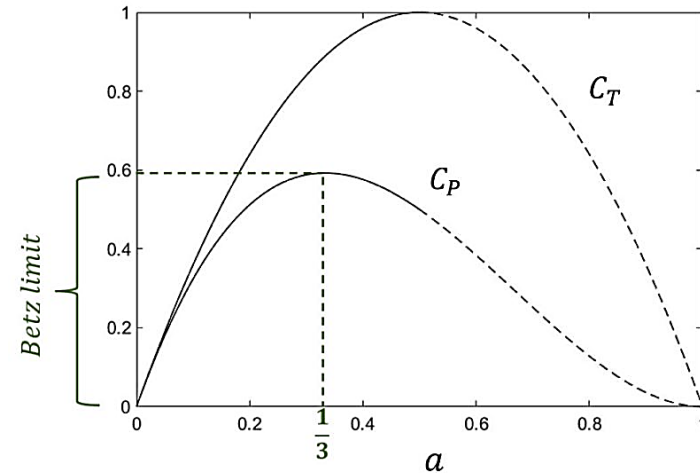


$$\left\{ \begin{array}{l} T = (p_D^+ - p_D^-) A_D = 2\rho A_D U_\infty^2 a(1-a) \\ C_T = \frac{\text{Thrust}}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2 A_D} \end{array} \right.$$

$$C_T = 4a(1-a)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Power} = T U_D = 2\rho A_D U_\infty^3 a(1-a)^2 \\ C_P = \frac{\text{Power}}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^3 A_D} \end{array} \right.$$

$$C_P = 4a(1-a)^2$$



$$\frac{dC_P}{da} = 4(1-a)(1-3a) = 0$$

$$a = \frac{1}{3}$$

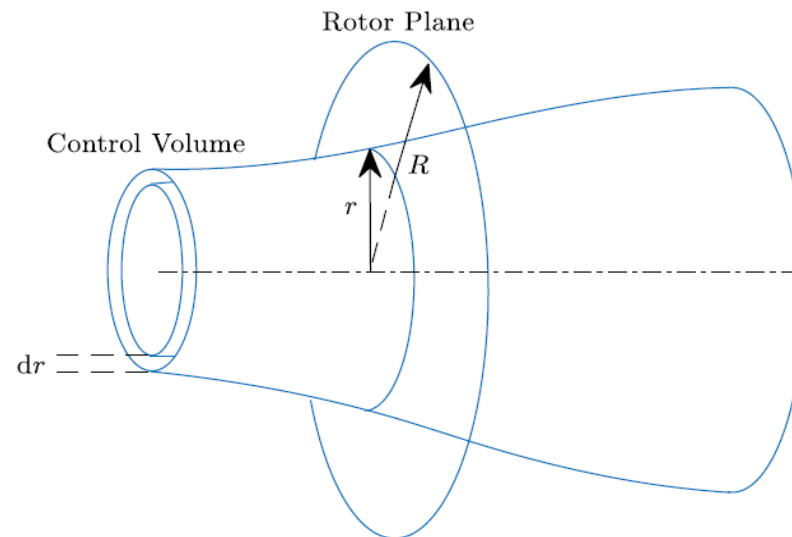
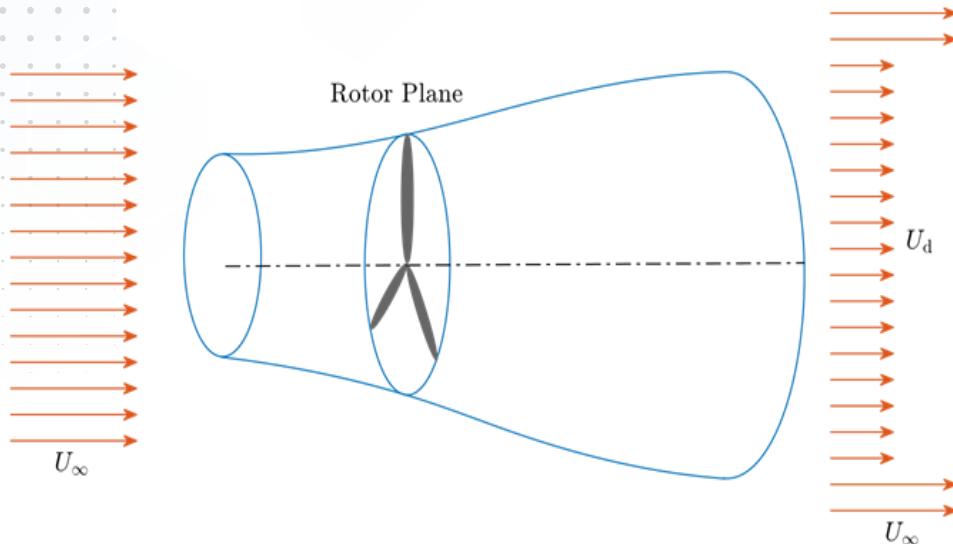
$$C_{P_{\max}} = \frac{16}{27} = 0.593$$





نظریه مومنتوم المان پره

روش مومنتوم المان پره به کمک اصل بقای جرم و مومنتوم با یک سری فرضیات جهت طراحی پره و پیش‌بینی عملکرد توربین‌های محور افقی استفاده می‌شود. □



$$U_a = \frac{U_\infty + U_d}{2}$$

$$U_a = (1 - a)U_\infty$$

$$U_d = (1 - 2a)U_\infty$$

$$U_\theta = a'r\Omega$$

$$U_{d,\theta} = 2a'r\Omega$$

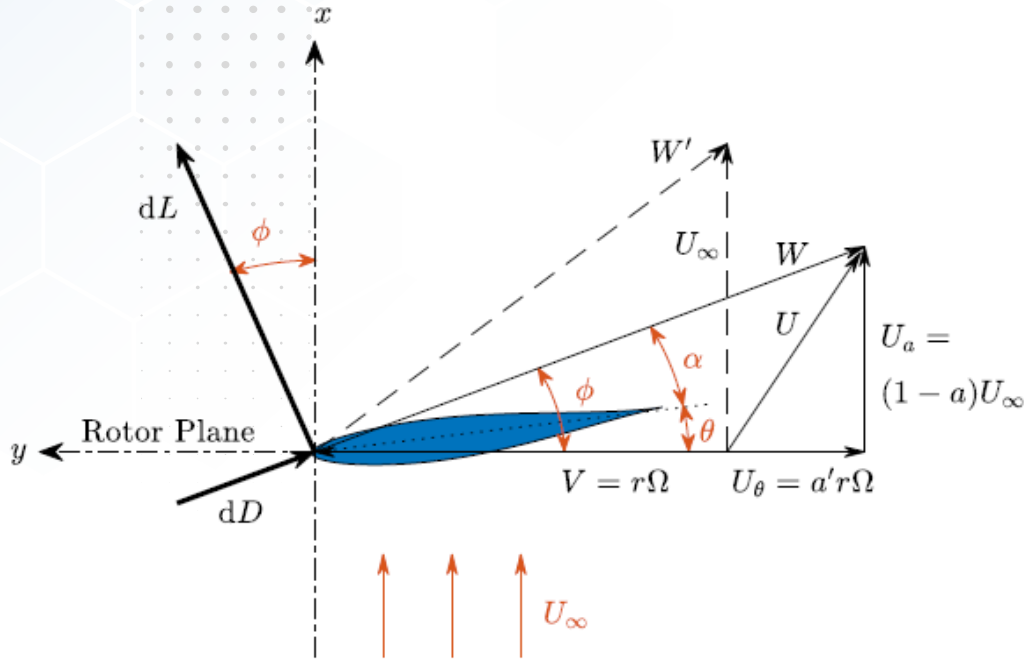
$$dT = 4\pi\rho r(U_\infty^2 a(1 - a) + (a'r\Omega)^2)dr$$

$$dM = 4\pi\rho r^3\Omega U_\infty a'(1 - a)dr$$





نظریه مومنتوم المان پره



$$W_a = (1 - a)U_\infty$$

$$W_\theta = (1 + a')r\Omega$$

$$\tan\phi = \frac{(1 - a)U_\infty}{(1 + a')r\Omega}$$

$$\alpha = \phi - \theta$$

$$dL = \frac{1}{2}\rho c B W^2 C_l dr$$

$$dD = \frac{1}{2}\rho c B W^2 C_d dr$$

$$dT = dL \cos\phi + dD \sin\phi$$

$$dM = r(dL \sin\phi - dD \cos\phi)$$

فرضیات کلی این روش عبارت‌اند از:

✓ حالت پایا

✓ سیال غیرلزج

✓ جریان تراکم‌ناپذیر

✓ صرف‌نظر از تغییر شکل پره

نسبت سرعت نوک پره (سرعت دورانی بی‌بعد شده)

توان تولیدی توربین

ضریب توان

ضریب نیروی رانش

$$TSR = \frac{R\Omega}{U_\infty}$$

$$P = M\Omega$$

$$C_P = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^3 A}$$

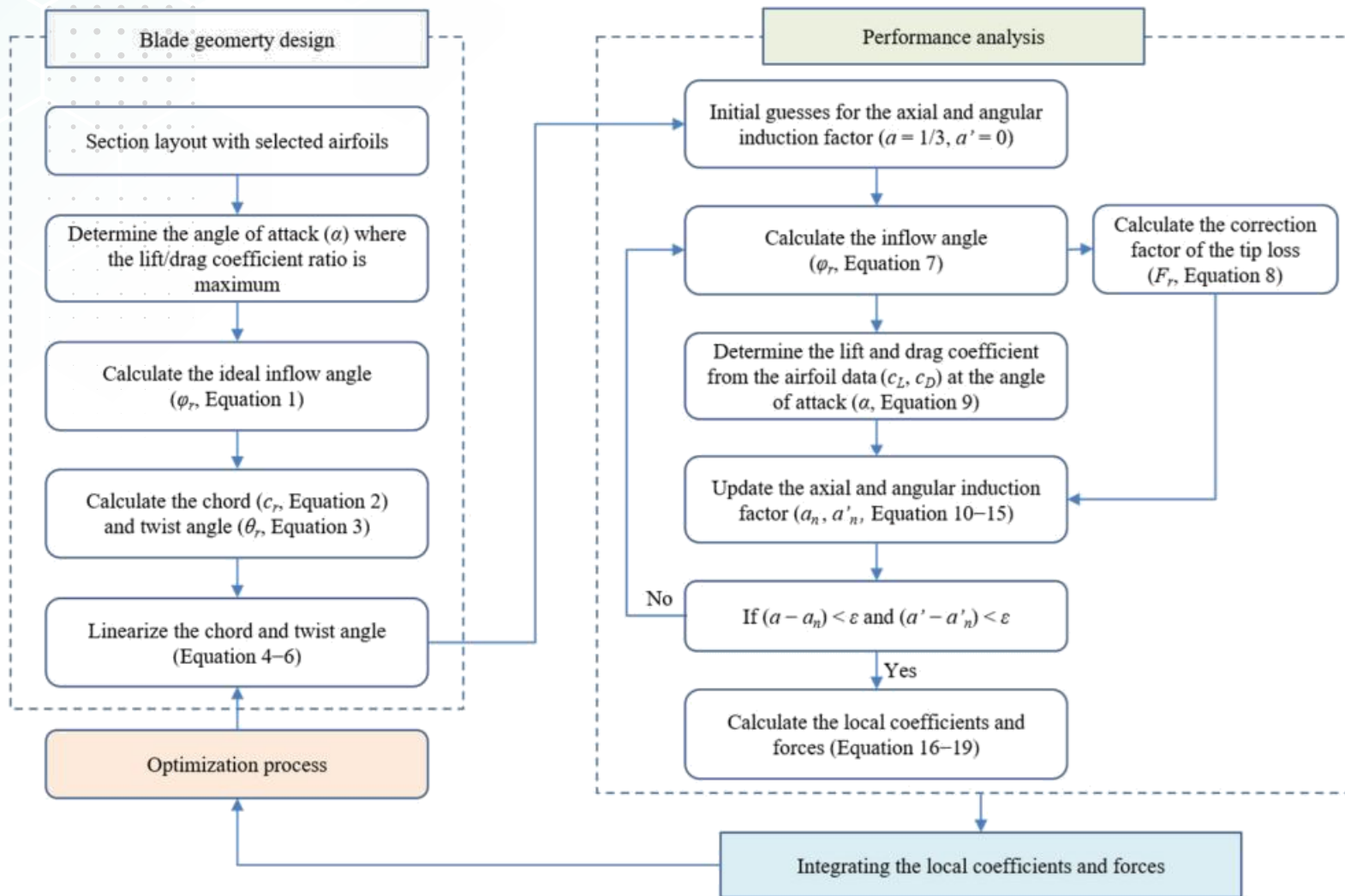
$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2 A}$$





نمونه مقاله توربین باد

طراحی پره بهینه به کمک
تئوری BEM و الگوریتم
بهینه‌سازی

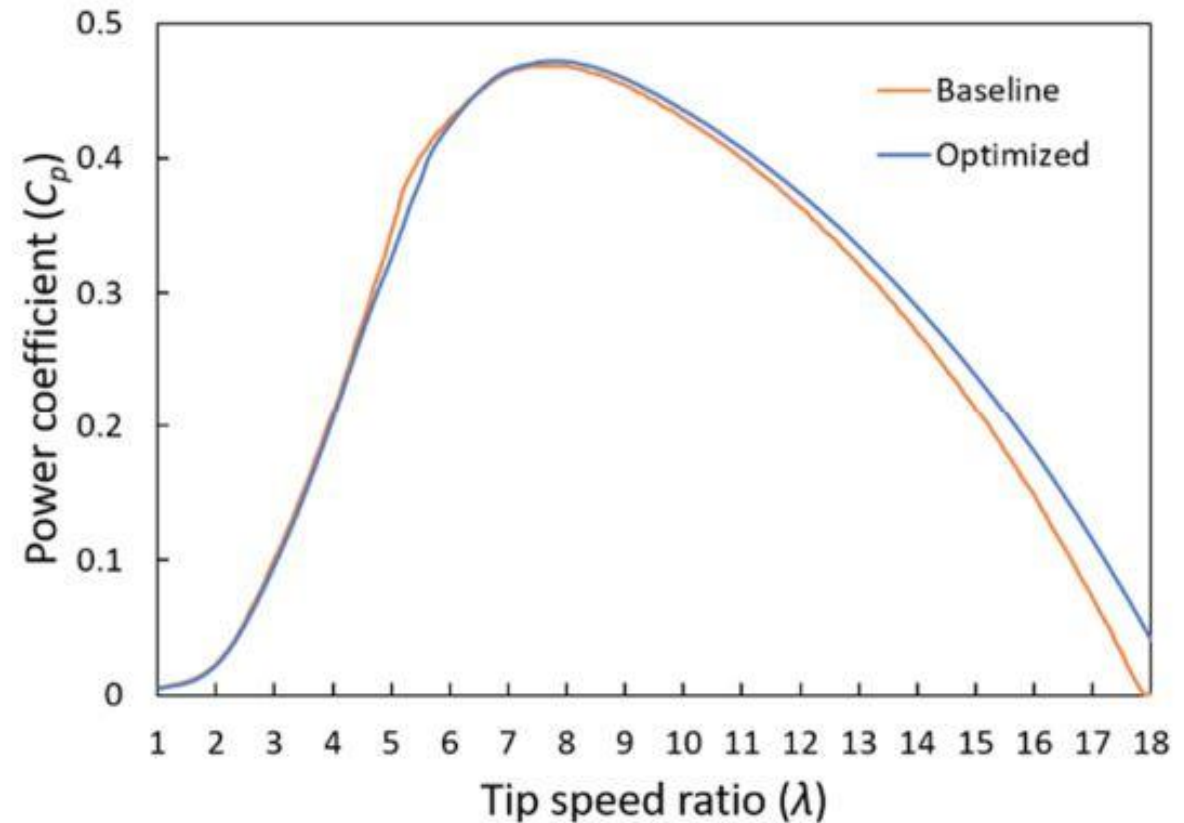




نمونه مقاله توربین باد

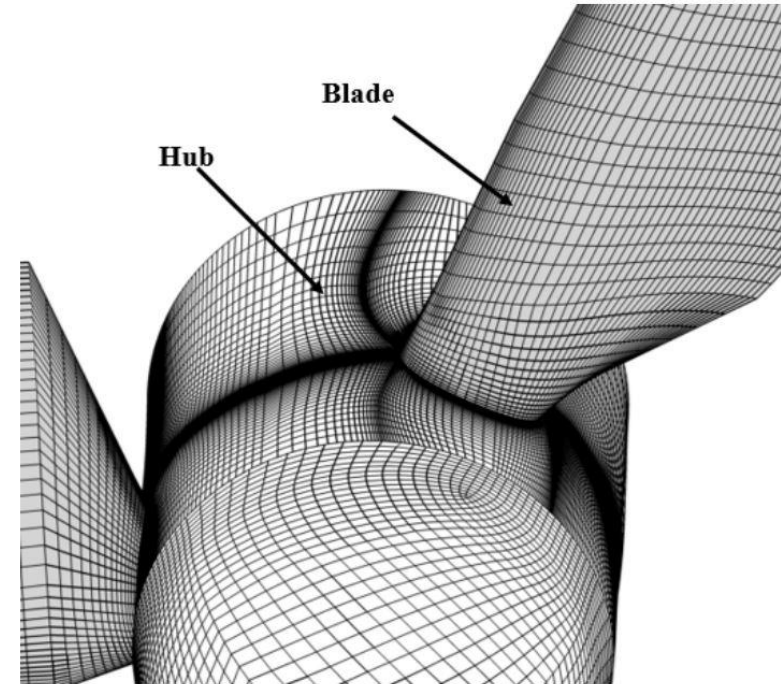
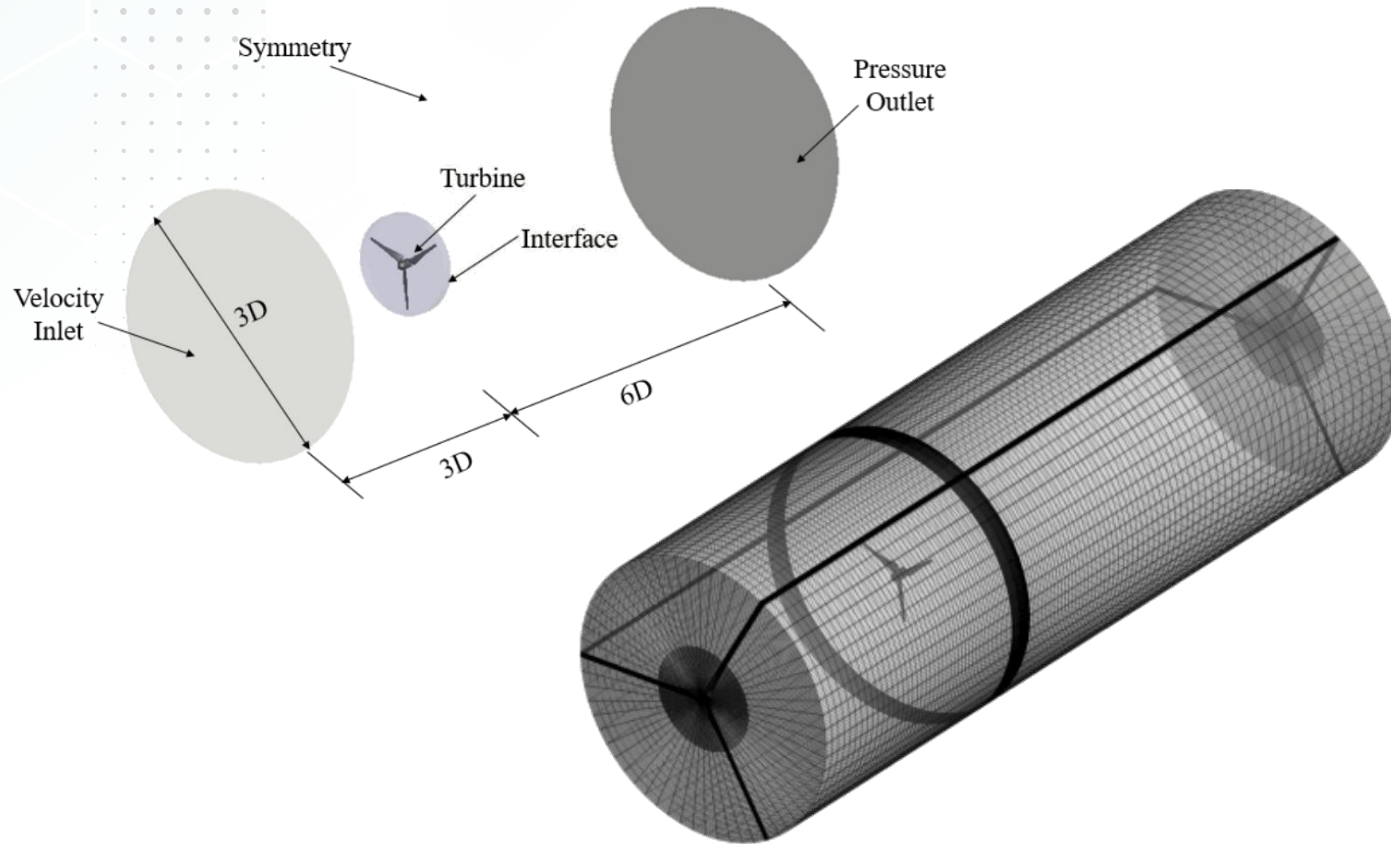
❖ طراحی پره بهینه به کمک
تئوری BEM و الگوریتم
بهینه‌سازی

Property	Value
Rated power (MW)	5
Number of blades	3
Hub height (m)	90
Rotor diameter (m)	126
Cut-in, rated, cut-out wind speed (m/s)	3, 11.4, 25
Cut-in, rated rotor speed (rpm)	6.9, 12.1
Rated tip speed (m/s)	80



نمونه مقاله توربین باد

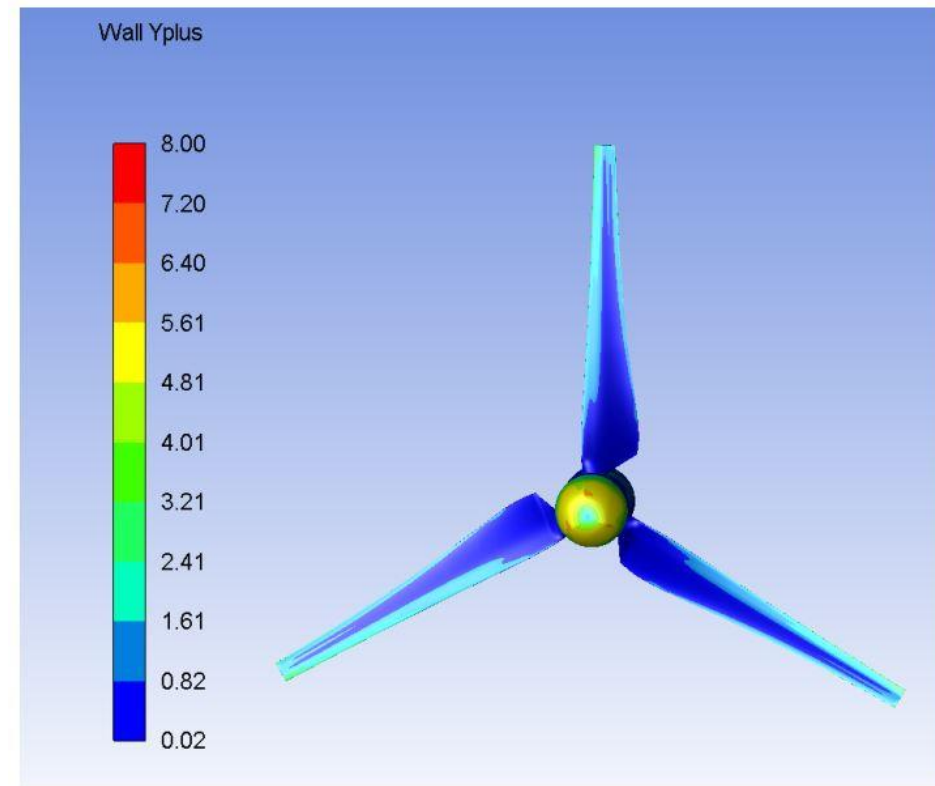
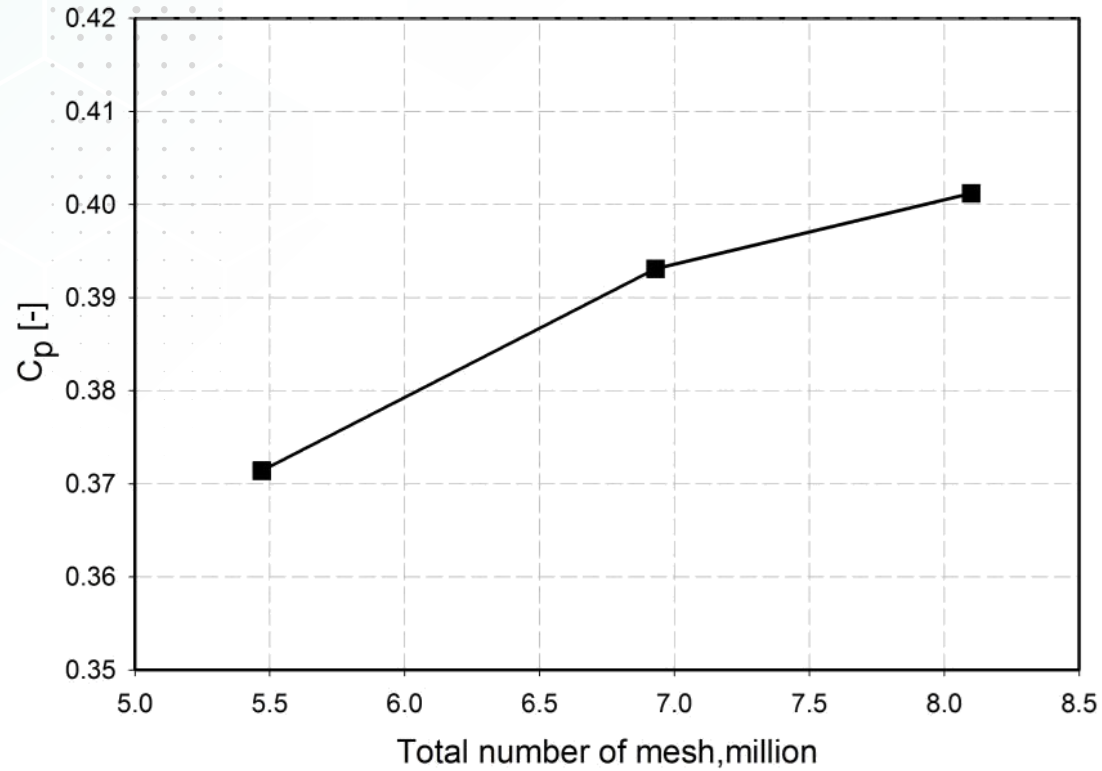
❖ شماتیک دامنه محاسباتی،
شروط مرزی و شبکه
محاسباتی





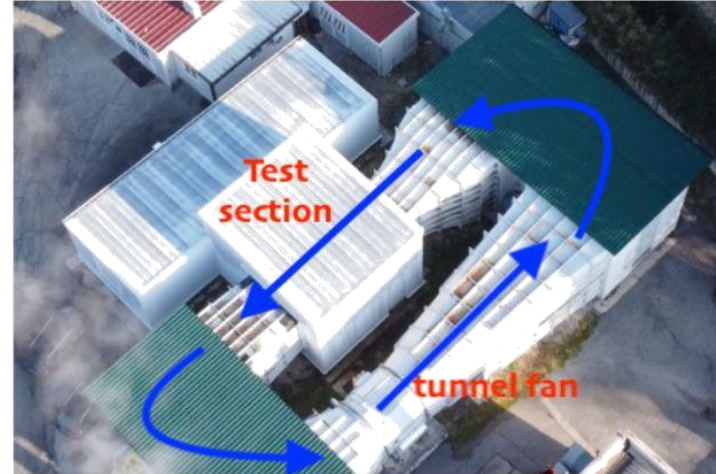
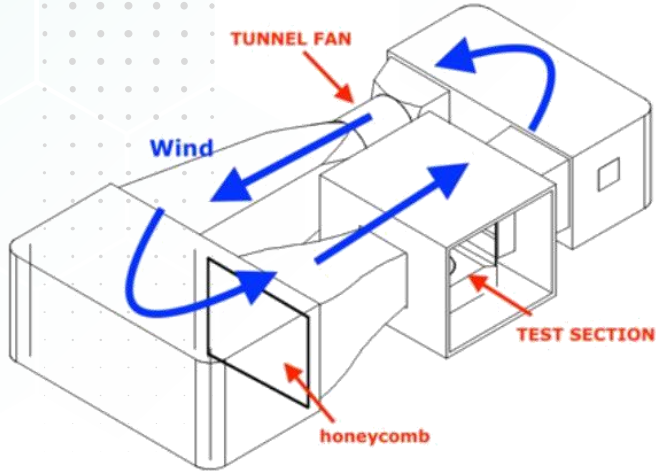
نمونه مقاله توربین باد

❖ استقلال حل از شبکه و
نمونه نتایج

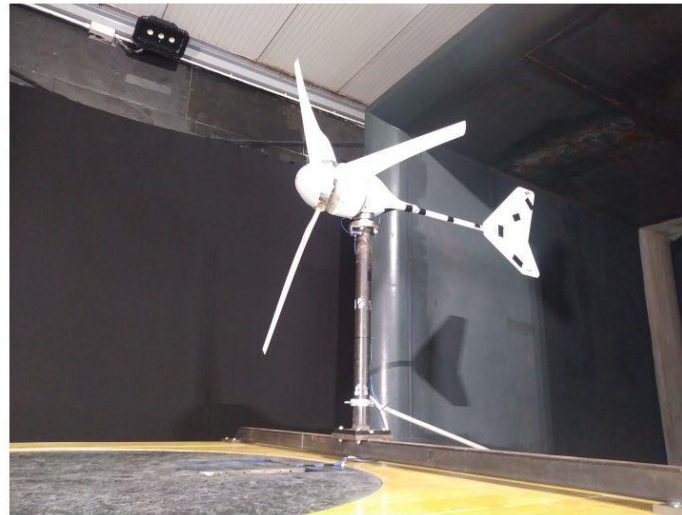




نمونه مقاله توربین باد



❖ شماتیک تونل باد و مسئله
مورد بررسی در دو حالت
مختلف ۳ پره و ۵ پره



(a)

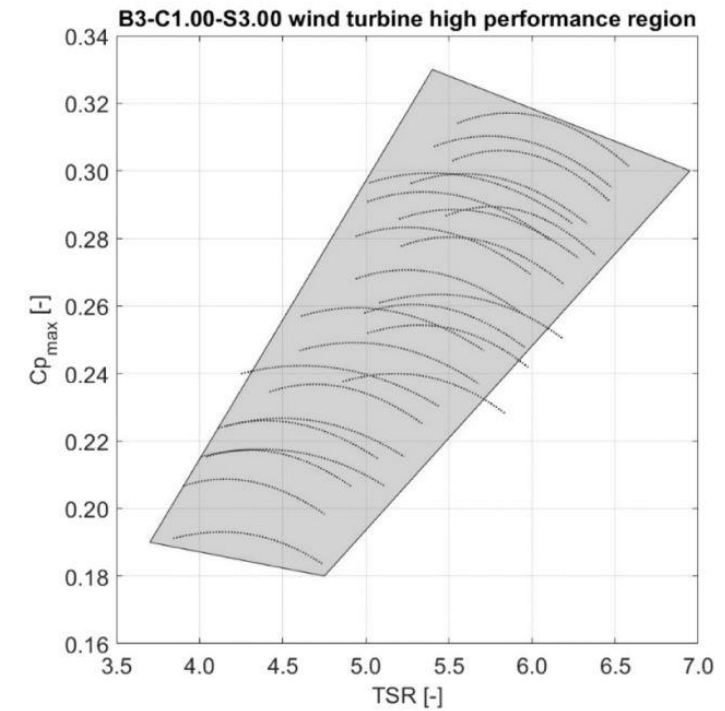


(b)

Vedovelli, M., Eltayesh, A., Natili, F. and Castellani, F., 2022. Experimental and Numerical Investigation of the Effect of Blades Number on the Dynamic Response of a Small Horizontal-Axis Wind Turbine. *Energies*, 15(23), p.9134.



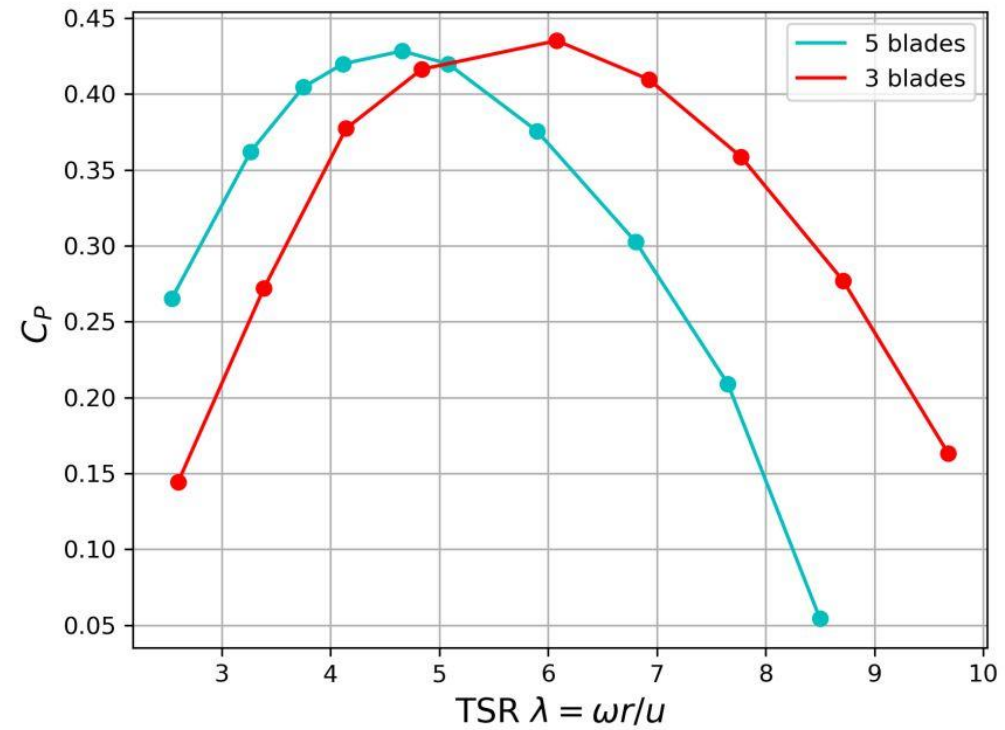
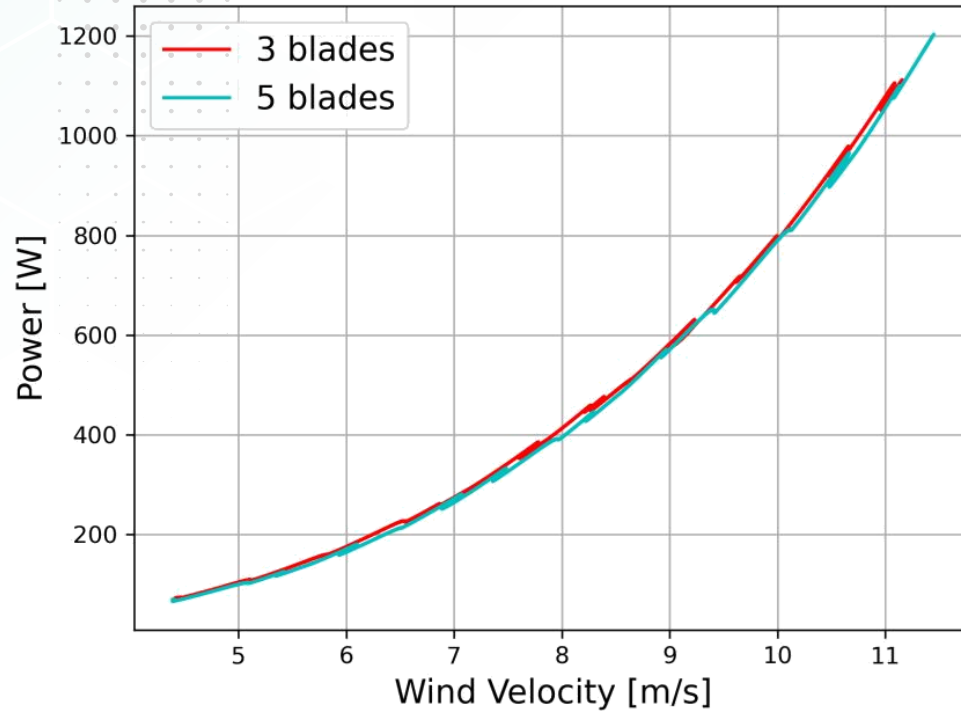
تونل باد و نمونه نتایج مقاله





نمونه مقاله توربین باد

نمونه نتایج مقاله ❖



سپاس از توجه شما
